

Janne Keränen

LÄÄKETEHTAAN MUUNTAMOUUSINTA

Ratkaisuvaihtoehtojen vertailu

LÄÄKETEHTAAN MUUNTAMOUUSINTA

Ratkaisuvaihtoehtojen vertailu

Janne Keränen
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma, Sähköinen talotekniikka

Tekijä: Janne Keränen

Opinnäytetyön nimi: Lääketehtaan muuntamouusinta – ratkaisuvaihtoehtojen vertailu

Työn ohjaaja: Ensio Sieppi

Työn valmistumislukukausi- ja vuosi: Kevät 2016

Sivumäärä: 102 + 5 liitettä

Opinnäytetyön aiheena oli lääketehtaan muuntamouusinnan eri ratkaisuvaihtoehtojen vertailu ja sen tilaajana toimi Fermion Oy. Muuntamouusinta tulee ajankohtaiseksi Fermion Oy:n Oulun lääketehtaassa, kun sitä laajennetaan lähitulevaisuudessa. Lisäksi Oulun lääketehtaan muuntajat ovat jo melko vanhoja.

Työn tavoitteena oli perehtyä eri näkökohtiin, joita muuntajien uusinnassa tulisi ottaa huomioon ja luoda näin perusta Fermion Oy:lle lopullisen ratkaisuvaihtoehdon valinnalle. Ratkaisuvaihtoehtoina tarkasteltiin muuntajien uusintaa nykyisille paikoilleen, uuden puistomuuntamon rakentamista sekä muuntajien sijoittamista samaan jo olemassa olevaan sisämuuntamoon.

Työssä koottiin ensin teoratietoa muuntajista ja niihin liittyvistä komponenteista sekä oikosulkuvirta- ja jännitteenalenemalaskennassa tarvittavista kaavoista ja olettamuksista. Teoriaosuuden jälkeen kartoitettiin lääketehtaan sähkön syötön nykytilannetta ja laskettiin sen sähköisiä ominaisuuksia. Tämän jälkeen laskettiin pääkeskusten kiskostojen oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat eri ratkaisuvaihtoehdoissa. Koska pääkeskusten syöttöjohdot olivat hyvin eripituisia, laskettiin myös niiden aiheuttamat teho- ja energiahäviöt sekä energiakustannukset.

Opinnäytetyön tuloksista yritys saa kuvan eri ratkaisuvaihtoehtojen hyödyistä ja haitoista sekä huomioon otettavista seikoista. Ennen varsinaista muuntamouusintaa olisi yrityksen laskettava vielä vaihtoehtojen investointi- ja käyttökustannukset, jotka ovat myös tärkeitä valinnan kriteereitä.

Asiasanat: jännitteenalenema, muuntaja, oikosulkuvirta, tehohäviö

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services, Electrical Building Services

Author: Janne Keränen

Title of thesis: Pharmaceutical Plant's Transformer Substation Renewal – The comparison of different solution alternatives

Supervisor: Ensio Sieppi

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2016 Number of pages: 102 + 5 appendices

The subject of this thesis was the comparison of different transformer substation renewal solution alternatives on a pharmaceutical plant. The work was commissioned by Fermion Oy. The transformer substation renewal will become necessary in Fermion Oy Oulu Plant in the near future as the plant will be expanded. In addition, the transformers in Oulu Plant are quite old.

The goal of the thesis was to get acquainted with the different aspects of renewing the transformers and by that to lay the foundation for Fermion Oy's final substation renewal solution selection. The considered renewal solutions were renewing the transformers to their current places, building a new compact secondary substation and renewing the transformers to one already existing indoor secondary substation.

The work started with collecting information about transformers and components relating to them and about short-circuit current and voltage drop calculation formulas. After the theory part, the current state of pharmaceutical plant's power supply system was mapped and its electrical properties were calculated. After that, the short-circuit currents and voltage drops on two main switchboard busbar systems were calculated in all the different renewal solution alternatives. The power and energy losses of the main switchboard supply lines were also calculated as the cable lengths varied a lot between the alternative solutions.

As a result of this thesis, the company gets an image from the pros and cons of the different solution alternatives and finds out the factors to be considered. Before the actual transformer substation renewal, the company should calculate the investment and operating costs of different renewal solution alternatives, as it would be an important selection criterion.

Keywords: power loss, short-circuit current, transformer, voltage drop

ALKULAUSE

Haluan kiittää Fermion Oy:tä opinnäytetyön mahdollistamisesta. Suuri kiitos kuuluu etenkin lääke-
tehtaan sähkötöiden johtaja Kimmo Toppiselle, joka toimi työn valvojana ja jakoi kiireistään huoli-
matta neuvoa opinnäytetyöhön liittyvissä asioissa. Haluan myös kiittää työn ohjaajana toiminutta
Oulun ammattikorkeakoulun yliopettaja Ensio Sieppiä, joka näkemyksellään ja kokemuksellaan
auttoi saattamaan opinnäytetyön nykyiseen muotoonsa.

Oulussa 13.5.2016

Janne Keränen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS.....	6
1 JOHDANTO	9
2 MUUNTAJA.....	10
2.1 Voimamuuntaja	11
2.1.1 Kolmivaiheisen muuntajan kytkennät	11
2.1.2 Jännitteen säätäminen	14
2.2 Mittamuuntaja	15
2.3 Muuntajan häviöt ja lämpeneminen	16
2.4 Muuntajatyypit.....	17
2.4.1 Paisuntasäiliöinen jakelumuuntaja	17
2.4.2 Hermeettisesti suljettu jakelumuuntaja	17
2.4.3 Pylväsmuuntaja	17
2.4.4 Valuhartsieristeinen jakelumuuntaja.....	18
2.5 Muuntajan jäähdytys.....	18
2.5.1 Öljyjäähdytys	18
2.5.2 Vesijäähdytys	19
2.5.3 Ilmajäähdytys	19
2.6 Kuormitettavuus.....	19
3 MUUNTAMOKOJEISTO	21
3.1 Kokoojakiskostot.....	21
3.2 Katkaisijat	21
3.3 Erottimet	22
4 MUUNTAMO	24
4.1 Sisämuuntamo.....	24
4.2 Puistomuuntamo	25
4.3 Pylväsmuuntamo	25
5 OIKOSULKUVIRTA JA -IMPEDANSSI	26
5.1 Theveninin menetelmä	27

5.2	Mitoituksessa käytettävät oikosulkusuureet.....	29
5.3	Syöttöverkko	31
5.4	Muuntaja	32
5.5	Johdot ja kiskostot	34
5.6	Moottorit	35
5.7	Vikaimpedanssi.....	37
5.8	Redusointi.....	37
6	JÄNNITTEENALENEMA JA TEHOHÄVIÖ	39
6.1	Jännitteenalenema kolmivaihejärjestelmässä	39
6.2	Teho- ja energiahäviö	41
7	LÄÄKETEHTAAN NYKYTILAN SELVITTÄMINEN	43
7.1	Syöttöverkko	44
7.2	Muuntajat	46
7.3	Sähkönkulutus	47
7.4	Syöttöjohdot.....	49
7.5	Katkaisijat ja erottimet.....	51
7.6	Kuormat	53
8	RATKAISUVAIHTOEHTO 1: MUUNTAJAT NYKYISILLE PAIKOILLEEN	58
8.1	Muuntajat	58
8.2	Syöttöjohdot.....	59
8.3	Kojeisto	60
8.4	Impedanssien määrittäminen.....	61
8.4.1	Syöttävä verkko	61
8.4.2	Muuntajat.....	63
8.4.3	Syöttöjohdot	65
8.4.4	Ekvivalenttimoottorit	65
8.4.5	Ekvivalenttijohdot	68
8.5	Oikosulkuvirrat 400 V pääkeskusten kiskostoissa	70
8.5.1	Pääkeskuksen 1 suurimmat alkuoikosulkuvirrat.....	70
8.5.2	Pääkeskuksen 2 suurimmat alkuoikosulkuvirrat.....	71
8.5.3	Pääkeskuksen 1 sysäysoikosulkuvirta	73
8.5.4	Pääkeskuksen 2 sysäysoikosulkuvirta	74
8.5.5	Pääkeskuksen 1 pienimmät oikosulkuvirrat	75
8.5.6	Pääkeskuksen 2 pienimmät oikosulkuvirrat	77

8.6	Jännitteenalenemat pääkeskusten kiskostoissa	77
8.6.1	Pääkeskuksen 1 jännitteenalenema.....	77
8.6.2	Pääkeskuksen 2 jännitteenalenema.....	78
8.7	Tehohäviöt	79
9	RATKAISUVAIHTOEHTO 2: PUISTOMUUNTAMO	81
9.1	Muuntajat	81
9.2	Syöttöjohdot.....	82
9.3	Kojeisto	84
9.4	Oikosulkuvirrat 400 V pääkeskusten kiskostoissa	84
9.5	Jännitteenalenemat pääkeskusten kiskostoissa	85
9.6	Tehohäviöt	85
10	RATKAISUVAIHTOEHTO 3: MUUNTAJAT VIEREKKÄIN	87
10.1	Muuntajat	87
10.2	Syöttöjohdot.....	87
10.3	Kojeisto	90
10.4	Oikosulkuvirrat 400 V pääkeskusten kiskostoissa	90
10.5	Jännitteenalenemat pääkeskusten kiskostoissa	91
10.6	Tehohäviöt	91
11	RATKAISUVAIHTOEHTOJEN VERTAILU	93
12	POHDINTA.....	96
	LÄHTEET	98
	LIITTEET	102

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on Fermion Oy:n Oulun lääke tehdään kahden 20kV/400V-muuntajan uusimisen eri ratkaisuvaihtoehtojen pohtiminen ja vertailu. Vuonna 1974 rakennettu, sen jälkeen useita kertoja laajennettu lääke tehdään sijaitsee noin 12 km:n päässä Oulun keskustasta kaakkoon. Tehtaassa valmistetaan kemiallisesti lääkeaineita esimerkiksi syövän hoitoon tarkoitettuihin lääkkeisiin. Tehdas toimii viisivuororajärjestelmässä siten, ettei tuotanto keskeydy muulloin kuin kesän kuukauden mittaisessa kunnossapitoseisokissa. Tehtaan sähkönkulutuksenkin voidaan siis lähtökohtaisesti olettaa olevan vuorokaudenajasta riippumatonta.

Tehtaan muuntajien uusinta tulee ajankohtaiseksi lähivuosina mahdollisen laboratoriotilojen laajennuksen sekä muuntajien korkean iän seurauksena. Laajennuksen myötä toinen muuntajista jäisi laboratoriotilojen viereen, mikä ei ole toivottavaa. Opinnäytetyössä vertaillaan muuntajien uusinnan ja uudelleensijoittamisen eri ratkaisuvaihtoehtoja sekä niiden hyötyjä ja haittoja.

2 MUUNTAJA

Muuntaja on vaihtosähköllä toimiva, rakenteeltaan varsin yksinkertainen sähkökone, joka mullisti 1900-luvulla sähkönsiirron. Koska muuntaja mahdollisti vaihtosähkön helpon jännitetasojen muuttamisen energiansiirron tarpeiden mukaan, tuli vaihtosähköstä vallitseva sähköjakelumuoto. (1, s. 267.) Muuntaja koostuu sähkötehon tuovasta ensiökäämistä sekä sähkötehon vastaanottavasta toisiokäämistä, joita yhdistää rautasydän. Muuntajan käämit ovat käytännössä yhteisen rautasydämen ympärille kierretyt eristeelliset kupari- tai alumiinijohtimet, joiden kierrosten lukumäärien suhteella voidaan vaikuttaa suoraan verrannollisesti ensiö- ja toisiopuolen jännitteiden muutosuhteeseen. (1, s. 269–270.) Muuntajan tehtävänä on edellä mainitun jännitetason muuttamisen lisäksi myös sähköverkkojen galvaaninen erottaminen sekä oikosulkuvirtojen pitäminen hallituissa arvoissa (2, s. 1).

Mikäli ensiökäämin kierrosluku on suurempi kuin toisiokäämin kierrosluku eli muuntosuhde $\mu > 1$, on toisiojännite ensiojännitettä matalampi (kaava 1). Tällöin kyseessä on jännitettä alentava muuntaja. Mikäli ensiökäämin kierrosluku onkin sen sijaan pienempi kuin toisiokäämin kierrosluku eli muuntosuhde $\mu < 1$, on toisiojännite ensiojännitettä korkeampi ja kyseessä on jännitettä nostava muuntaja. (3, s. 13.)

$$\mu = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

KAAVA 1

N_1 = ensiökäämin kierrosluku

N_2 = toisiokäämin kierrosluku

U_1 = ensiojännite

U_2 = toisiojännite

I_1 = ensiövirta

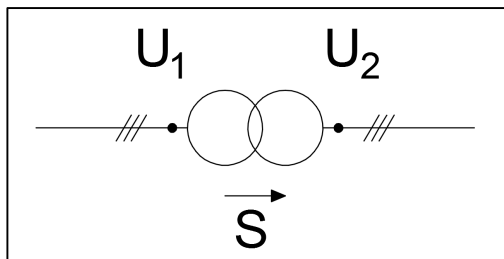
I_2 = toisiovirta

Jännitetasoa muuttavien muuntajien käämit voidaan nimetä myös jännitteiden mukaan ylä- ja alajännitekäämeiksi. Yläjännitekäämeillä viitataan nimensä mukaisesti käämeihin, joiden nimellisjännite on suurempi, ja alajännitekäämeillä käämeihin, joiden nimellisjännite on pienempi. Ylä- ja alajännitekäämien välinen välillä liikkuvan tehon suunta riippuu siitä, onko kyseessä jännitettä

nostava vai alentava muuntaja. Jakelumuuntajassa ensiökäämi on siis yläjännitekäämi ja toisiokäämi alajännitekäämi.

2.1 Voimamuuntaja

Muuntajat voidaan jakaa käyttötarkoitustensa mukaan eri ryhmiin, joista tärkeimpinä voidaan pitää voimamuuntajia ja mittamuuntajia. Voimamuuntajan (kuva 1) tehtävänä on muuttaa ensiöpuolen jännite U_1 toisiopuolen jännitteeksi U_2 energiansiirron tarpeiden mukaisesti. (1, s. 267.) Koska Suomen sähköverkko on kolmivaiheinen, myös suurin osa sen muuntajista on kolmivaiheisia. Kolmivaiheisia voimamuuntajia käytetään siis esimerkiksi sähköjakeluverkossa nostamaan voimalaitosten sähköä tuottavien generaattoreiden jälkeinen jännitetaso (generaattoreiden tuottama maksimijännite on eristysteknillisistä syistä noin 30 kV) kantaverkolle sopivaksi tai toisaalta laskemaan sähköverkon jännitetasoa portaittain, mitä lähemmäksi varsinaisia kulutuspisteitä siirrytään (1, s. 267).



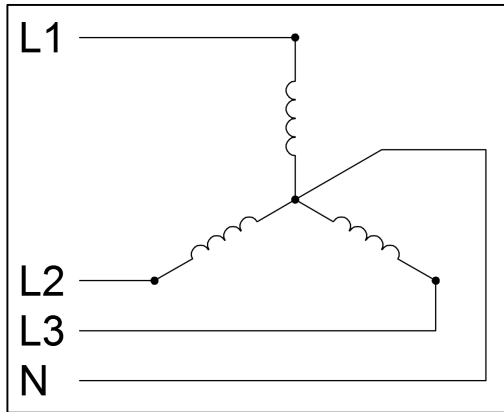
KUVA 1. Voimamuuntajan toimintaperiaate, jossa U_1 on ensiöjännite, U_2 on toisiojännite ja S on siirrettävä sähköteho (1, s. 267)

Kolmivaiheiset voimamuuntajat voidaan jakaa edelleen kahteen luokkaan tehon ja jännitteen mukaan. Jakelu- eli pientehomuuntajiksi nimitetään muuntajia, joiden nimellisteho on enintään 3150 kVA ja nimellisjännite on enintään 20 kV. Tätä suurempia voimamuuntajia nimitetään suurtehomuuntajiksi. (1, s. 283.)

2.1.1 Kolmivaiheisen muuntajan kytkennät

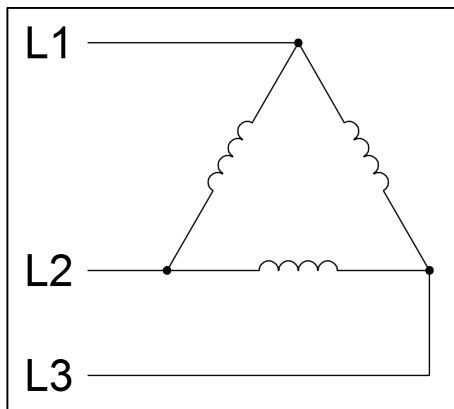
Kolmivaiheisen tehomuuntajan käämit voidaan kytkeä joko tähteen, kolmioon tai hakatähteen. Tähti ja kolmiokytkentää voidaan käyttää sekä ylä- että alajännitekäämityksessä, kun taas harvinaisempaa hakatähtikytkentää käytetään ainoastaan alajännitekäämityksessä.

Tähtikytkenässä (kuva 2) (merkitään y-kirjaimella) käämien toiset päät kytketään kukin omaan vaihejohtimeensa ja toiset päät kytketään yhteen. Näin käämien yli vaikuttaa vaihejännite. Yhteen kytketty tähtipiste on käämityksen nollapiste (merkitään n-kirjaimella), ja se voidaan tuoda muuntajan liittimille. (1, s. 282.)



KUVA 2. Tähteen kytketyt käämit

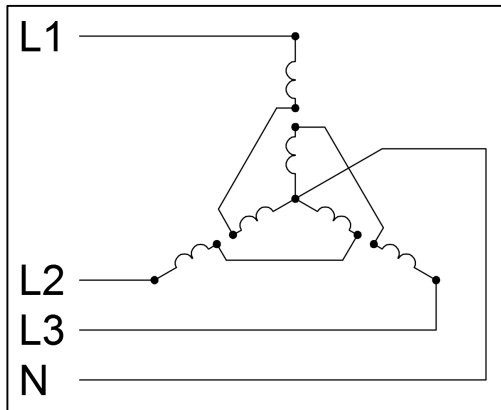
Kolmiokytkennässä (kuva 3) (merkitään d-kirjaimella) käämien molemmat päät kytketään vaihejohtimiin, jolloin niiden yli vaikuttaa vaihejännite. Kolmiokytkennästä ei saada nollapistettä. (1, s. 282.)



KUVA 3. Kolmioon kytketyt käämit

Hakatahtikytkeä (kuva 4) (merkitään z-kirjaimella) on kytkennöistä harvinaisin, ja sitä käytetään ainoastaan jakelumuuntajien alajännitepuolella. Hakatahtikytkeä on sähköjohdon kannalta samanlainen kytkentä kuin tähtikytkeä, mutta se sallii tähtikytkeää paremmin epäsymmetrisen kuormituksen vääristämättä jännitteitä epäsymmetriaan. Siinä jokaisella pylväällä oleva käämi on jaettu kahteen johdinkierroksiltaan yhtä suureen osaan. Kuhunkin vaihejohtimeen kytketään kaksi

kääminpuolikasta sarjaan eri pylväiltä. Sarjaan kytkettyjen jälkimmäisten kääminpuolikkaiden toiset päät kytketään yhteen. Yhteen kytketty tähtipiste on käämityksen nollapiste, ja se voidaan tuoda muuntajan liittimille. (1, s. 282.)



KUVA 4. Hakatahteen kytketyt käämit

Ylä- ja alajännitekäämien erilaisista kytkentäyhdistelmistä on muodostettu kaksitoista standardoitua kytkentää, jotka voidaan jakaa neljään eri kytkentäryhmään. Kytkentäryhmiä merkitään tunnusluvulla 0, 5, 6 ja 11. (2, s. 11.) Kukin kytkentä voidaan ilmoittaa kirjainsymbolien ja tunnusluvun avulla. Kirjaimista ensimmäinen ilmoittaa ensiökäämien kytkennän, joka on joko tähtikytkentä (y-kirjain) tai kolmiokytkentä (d-kirjain). Mikäli ensiöstä saadaan nollapiste eli tähtikytkennän tähtipiste, sitä merkitään n-kirjaimella. Tämän jälkeen ilmoitetaan samalla tyylillä toisiokäämien kytkentä (y, d tai z, sekä mahdollisesti n). Kytkennän kirjaintunnuksista isoilla kirjaimilla merkityt kytkennät ovat yläjännitepuolta ja pienillä kirjaimilla merkityt kytkennät alajännitepuolta. (3, s. 24.)

Tunnuksen numero-osa eli tunnusluku kertoo kytkennän ensiön ja toision välisen vaihe-eron. Kun valitaan ensiöpuolelta jonkin vaiheen kuvitteellinen jänniteosoitin ja asetetaan se kellotaulun kello kahdentoista suuntaiseksi, kytkentäryhmän tunnusluku kertoo toisiopuolen vastaavan jänniteosoittimen kulman kellotaulun osoittimena. Mikäli siis tunnusluku on esimerkiksi 5, ensiöpuolen L1-vaiheen jänniteosoittimen osoittaessa kello kahteentoista toisiopuolen vastaavan vaiheen jänniteosoitin osoittaa kello viiteen. Toisiojännite on siis 150° jäljessä ensiojännitettä. Tunnusluvun 0 kytkennässä ensiö- ja toisiopuolen jännitteissä ei ole vaihesiirtoa. Taulukkoon 1 on koottu standardoidut kolmivaihemuuntajakytkennät. (2, s. 11–12.)

TAULUKKO 1. Standardoidut kolmivaihemuuntajakytkennot. Yleisimmät Suomessa käytetyt kytkennot ovat Yy0, Dy11, Yd11 ja Yz11. (2, s. 12.)

TUNNUS- LUKU	KYTKENTÄ	OSOITINKUVAT		KYTKENNÄT	
		YLÄJÄNNITE	ALAJÄNNITE	YLÄJÄNNITE	ALAJÄNNITE
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

2.1.2 Jännitteen säätäminen

Jotta muuntajan alajännite saadaan, mahdollisista yläjännitteen tason vaihteluista huolimatta, pidettyä vakiona, on muuntajan muuntosuhdetta pystyttävä muuttamaan. Koska jakelumuuntajien yläjännitepuolen virrat ovat alajännitepuolen virtoja pienempiä, muuntosuhteen säätäminen tehdään pääasiassa muuttamalla yläjännitekäämien kierroslukua käämi- tai väliottokytkimellä. (2, s. 13.)

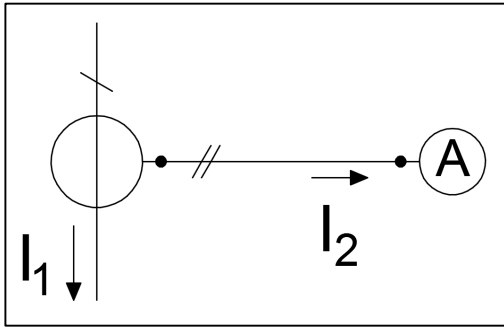
Väliottokytkimellä voidaan säätää muuntosuhdetta ainoastaan muuntajan ollessa jännitteetön. Tämän vuoksi se ei sovellu jatkuvaan jännitteen säätöön ja sitä käytetäänkin pidemmän aikavälin jännitemuutosten säätämiseen. Väliottokytkimen säätöalue on yleensä $\pm 2 \times 2,5 \%$ yläjännitteestä. Väliottokytkimen asentoa muutetaan mekaanisesti kääntökahvalla. (1, s. 282.)

Käämikytkimellä, toisin kuin väliottokytkimellä, muuntajan muuntosuhdetta voidaan säätää myös muuntajan ollessa jännitteellinen. Tämän ansiosta käämikytkimellä on mahdollista reagoida nopeasti sähköverkon jännitteen heilahteluihin, ja sitä voidaan siis käyttää jatkuvaan jännitteen säätöön. Yhdistettynä jännitteenmittaukseen ja automaatioon käämikytkimellä voidaan pitää alajännitettä vakiona halutussa arvossa moottoriohjauksen avulla. (1, s. 282–283.) Käämikytkin on yleensä väliottokytkintä useampiasentoinen. Käämikytkimen säätöalue voi olla esimerkiksi $\pm 9 \times 1,67 \%$ yläjännitteestä. (4, s. 5.)

2.2 Mittamuuntaja

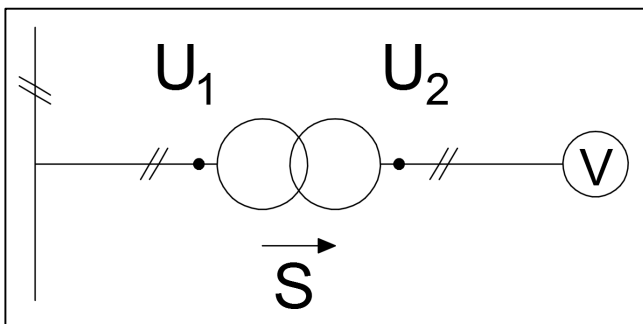
Mittamuuntajien tehtävänä on alentaa suuritehoisten vaihtovirtapiirien suuret virrat ja jännitteet mittalaitteiden ja releiden mittaus- ja toiminta-alueille sopiviksi (5, s. 40). Sen lisäksi, että mittamuuntajat näin suojaavat mittalaitteita ylikuormitukselta, erottavat ne myös mittausvirtapiirin päävirtapiiristä galvaanisesti (6, s. 134). Mittamuuntajat voidaan edelleen jakaa käyttötarkoituksensa ja rakenteensa mukaan virta- ja jännitemuuntajiin (5, s. 40–41).

Muista muuntajista poiketen virtamuuntajan (kuva 5) ensiökäämi kytketään sarjaan sen kuorman kanssa, jonka virtaa mitataan (1, s. 296). Virtamuuntajan ensiövirran suuruuden määrää siis sen mittaaman piirin kuormitusvirta (5, s. 40). Virtamuuntajan toiminta perustuu siihen että sen toisiovirran eli virtamittarin läpi kulkevan virran suhde ensiövirtaan eli mitattavan piirin kuormitusvirtaan on likimain vakio. Toision nimellisvirta on yleensä 5 A ensiön nimellisvirran ollessa virtamuuntajan muuntosuhteen mukaan esimerkiksi 100 A, 500 A tai 1000 A. (1, s. 298.)



KUVA 5. Virtamuuntajan toimintaperiaate, jossa I_1 on ensiövirta, I_2 on toisiovirta ja A on virtamittari (1, s. 267)

Jännitemuuntaja (kuva 6) on toiminnaltaan periaatteessa kuin erittäin pienitehoinen voimamuuntaja (1, s. 294). Eristyksensä perusteella sen ensiöpuoli kytketään joko vaihejännitteeseen (yksinapaisesti eristetty jännitemuuntaja) tai pääjännitteeseen (kaksinapaisesti eristetty jännitemuuntaja). Jännitemuuntajan toision nimellisjännite on usein 100 V, ja siihen kytketään jännitemittari. (5, s. 41–42.)



KUVA 6. Jännitemuuntajan toimintaperiaate, jossa U_1 on ensiöjännite, U_2 on toisiojännite, S on siirrettävä sähköteho ja V on jännitemittari (1, s. 267)

2.3 Muuntajan häviöt ja lämpeneminen

Muuntajissa syntyvät tehohäviöt voidaan jakaa kupari- ja rautahäviöihin (3, s. 15). Näiden tehohäviöiden seurauksena muuntaja lämpenee. Lämpeneminen on huomioitu muuntajissa siten, että muuntajasta on otettavissa jatkuvasti nimellinen näennäisteho ilman, että muuntaja lämpenee liiaksi (1, s. 278). Kuparihäviöt P_k eli kuormitus- tai virtalämpöhäviöt, syntyvät muuntajan käämityksissä kuormitusvirtojen ja käämityksen resistiivisyyden seurauksena. Niinpä muuntajan kuormituksen suuruus vaikuttaa kuparihäviöiden suuruuteen. (3, s. 15.) Rautahäviöt P_0 eli tyhjäkäyn-

tihäviöt, muodostuvat sen sijaan hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä, jotka syntyvät muuntajan rautasydämessä. Rautahäviöt ovat sitä suurempia, mitä suurempi on muuntajan jännite. (2, s. 9.)

2.4 Muuntajatyypit

Jakelumuuntajat voidaan jakaa rakenteensa perusteella neljään eri ryhmään: paisuntasäiliöisiin jakelumuuntajiin, hermeettisesti suljettuihin jakelumuuntajiin, pylväsmuuntajiin sekä valuhartsieristeisiin jakelumuuntajiin (1, s. 284).

2.4.1 Paisuntasäiliöinen jakelumuuntaja

Suuri osa vanhoista öljyeristeisistä muuntajista on paisuntasäiliöisiä jakelumuuntajia. Paisuntasäiliöisessä jakelumuuntajassa öljyn tilavuudenmuutokset kompensoi paisuntasäiliö, jossa muuntajaöljy on ilman kanssa kosketuksissa. Vaikka öljyn ja ilman välinen kosketuspinta on paisuntasäiliössä pieni, imeytyy ilmasta jonkin verran kosteutta muuntajaöljyyn. Öljyyn imeytynyt vesi laskeutuu raskaampana aineena muuntajan pohjalle, josta se voidaan tarpeen vaatiessa poistaa. (1, s. 285.)

2.4.2 Hermettisesti suljettu jakelumuuntaja

Suuri osa nykyisin asennettavista jakelumuuntajista on hermeettisesti suljettuja muuntajia (5, s. 56). Nimensä mukaisesti hermeettiset muuntajat ovat kaasutiiviitä, eli niissä muuntajaöljy on eristetty ympäröivästä ilmasta (1, s. 285). Näin muuntajaöljy vanhenee hitaammin kuin paisuntasäiliöisessä jakelumuuntajassa. Jotta öljy ei olisi ilman kanssa tekemisissä, ei hermeettisessä muuntajassa ole paisuntasäiliötä. Sen sijaan muuntaja on täynnä muuntajaöljyä, ja sen rungon jäähdytysaallot on valmistettu elastisesta materiaalista, joka joustaa öljyn tilavuuden muutoksien mukaan. (5, s. 56.)

2.4.3 Pylväsmuuntaja

Pylväsmuuntaja on nimensä mukaisesti pylvääseen asennettava, rakenteeltaan yksinkertainen jakelumuuntaja. Pylväsmuuntajat ovat öljymuuntajia, joissa paisuntasäiliö on usein korvattu kan-

nen alle jätetyllä paisuntatilalla. Tällä pyritään helpottamaan muuntajan asentamista ja käsittelyä. Pylväsmuuntajissa ei myöskään ole yleensä käämi- tai väliottokytkeitä. (1, s. 286.)

2.4.4 Valuhartsieristeinen jakelumuuntaja

Valuhartsieristeinen jakelumuuntaja on kuivamuuntaja, joka soveltuu moniin käyttökohteisiin, joissa nestetäytteinen muuntaja on poissuljettu vaihtoehto esimerkiksi palo- tai saastumisvaaran vuoksi (5, s. 56). Kuivamuuntajat ovat usein itsesammuvia, eikä niissä ole, toisin kuin öljymuuntajissa, suurta palokuormaa (3, s. 32). Näin ollen valuhartsieristeinen muuntaja voidaan usein asentaa lähelle kuormitusta esimerkiksi tehdasympäristössä. Valuhartsieristeinen muuntajan ympäristön lämpötila ei saa laskea alle -20°C . (5, s. 56.)

2.5 Muuntajan jäähdytys

Muuntajan käämityksissä ja rautasydämessä syntyy lämpöhäviöitä, jotka on poistettava, jotta vältetään eristysten liian nopealta vanhenemiselta ja muuntajan mahdolliselta vaurioitumiselta. Muuntaja jäähdytetään väliaineeseen, joka on öljyä tai ilmaa. Jäähdytystä voidaan tehostaa edistämällä jäähdyttävän väliaineen virtausta muuntajassa tai jäähdyttävän väliaineen jäähtymistä. (5, s. 56.)

2.5.1 Öljyjäähdytys

Öljytäytteisessä muuntajassa käämien ja rautasydämen lämpö siirtyy niitä ympäröivään eristysöljyyn. Lämpimän öljyn tiheys on pienempi kuin viileämmän öljyn, minkä seurauksena se nousee käämien pintoja pitkin kohti öljysäiliön yläosaa. Tämän jälkeen lämmennyt öljy siirtyy säiliön ulkoreunoille ja törmää säiliön öljyä viileämpiin aaltoseiniin. Näin öljy luovuttaa lämpöä aallotetuille seinämille, minkä seurauksena sen tiheys kasvaa ja se laskeutuu taas muuntajan alaosiin. (5, s. 56–57.) Tällaista jäähdytystä kutsutaan luonnolliseksi öljyjäähdytykseksi (2, s. 3). Suuritehoisten öljymuuntajien jäähdytystä voidaan tehostaa jäähdytysradiaattoreilla, joilla jäähdytyspinta-alaa saadaan lisättyä. Tehon kasvaessa edelleen radiaattoreiden jäähtymistä voidaan tehostaa puhaltimilla (kiihdytetty öljyjäähdytys) ja öljynkiertoa pumpuilla. (5, s. 56–57.)

2.5.2 Vesijäähdytys

Mikäli öljymuuntajan pelkkä öljyjäähdytys ei riitä, voidaan sen toimintaa tehostaa vesijäähdytyksellä niin, että lämmin muuntajaöljy luovuttaa lämpöenergiaa vedelle lämmönvaihtimessa. Tämän jälkeen vesi jäähdytetään edelleen ilmaan radiaattoreiden avulla. Vesijäähdytystä käytetään suu-
rehkoissa teollisuusmuuntajissa, jotka ovat sisällä lämpimässä ympäristössä, jossa jäähdytysilmaa ole saatavissa tarpeeksi paljon. (5, s. 57.)

2.5.3 Ilmajäähdytys

Koska kuivamuuntajissa ei ole öljyä, täytyy ne jäähdyttää ilman avulla. Käämeissä ja rautasydämessä syntyvä lämpöenergia siirtyy säteilemällä niitä ympäröivään ilmaan. Myös ilma nousee tämän jälkeen luonnollisesti öljyn tavoin, lämpimämpänä ja harvempana ylöspäin, ja sen tilalle virtaa muuntajan ympäriltä viileämpää ilmaa. Tätä kutsutaan luonnolliseksi ilmajäähdytykseksi. Jäähdytystä voidaan tehostaa nopeuttamalla ilmavirtaa puhaltimilla (kiihdytetty ilmajäähdytys). (2, s. 3.)

2.6 Kuormitettavuus

Muuntajan normaali käyttöikä tarkoittaa aikaa, jonka muuntaja kestää ollessaan jatkuvasti kuormitettuna nimelliskuormallaan jäähdytysilman ollessa +20 °C lämmintä. Tällöin muuntajan katsotaan vanhenevan normaalilla nopeudella. Todellisuudessa kuitenkin muuntajan kuorma on vaihteleva, ja pienellä kuormituksella käyvä muuntaja vanhenee normaalia nopeutta hitaammin. Tämän seurauksena muuntajaa on tarpeen vaatiessa mahdollista kuormittaa suuren kuorman aikana hetkellisesti yli nimelliskuormituksen ilman, että eristysten keskimääräinen vanhenemisnopeus kasvaa yli normaalin nopeuden. Taulukossa 2 on koottuna jakelumuuntajan kuormitettavuusker-toimia eri muuntopiireille muuntamotyyppien mukaan. (7, s. 7–8.)

TAULUKKO 2. Jakelumuuntajan kuormitettavuuskertoimia c_m (kuormitettavuuden suhde muuntajan nimellistehoon)

Muuntopiiri	Muuntamotyyppi		
	Pylväsmuuntamo	Puistomuuntamo	Sisämuuntamo
Pientaloalue, sähkölämmitys	1,5	1,4	1,2
Kerrostaloalue	1,5	1,4	1,2
Keskusta-alue	1,4	1,3	1,0
Teollisuusalue	1,4	1,3	1,0
Maaseutualue	1,5	1,4	1,2

Muuntajan todellinen kuormitettavuus S_{tod} on laskettavissa kuormitettavuuskertoimen avulla muuntajan nimellinäennäistehosta kaavalla 2 (7, s. 8).

$$S_{tod} = c_m \cdot S_n$$

KAAVA 2

3 MUUNTAMOKOJEISTO

3.1 Kokoojakiskostot

Kokoojakiskosto muodostuu tehoa siirtävistä virtakiskoista, niitä paikoillaan pitävistä tukieristimistä sekä kiskojen läpivientiin kennojen ja seinien läpi käytettävistä läpivientieristimistä. Tuki- ja läpivientieristimillä varmistetaan, etteivät kiskot pääse kosketuksiin kojeiston muiden osien kanssa, eikä valokaari pääse etenemään kennojen välillä. Kokoojakiskoston virtakiskot toimivat runkona muuntajakojeiston tehonsiirrossa. Niiden valmistusmateriaaleina on alumiini ja kupari, joista alumiini on painoonsa nähden hyvän sähkönjohtokyvyn ja hyvän lämmönpoistokyvyn ansiosta yleisempi. (5, s. 36–38.)

Kokoojakiskostojärjestelmät voidaan jakaa pääkiskojen lukumäärän mukaan yksi- ja kaksikiskojärjestelmään. Yksikiskojärjestelmässä on nimensä mukaisesti yksi pääkisko, minkä seurauksena sen hankintakustannukset ovat pienet, mutta toisaalta sen toimintavarmuus on yhden kiskon varassa. Kaksikiskojärjestelmässä pääkiskoja on kaksi, mikä lisää hankintakustannuksia mutta toisaalta lisää käyttövarmuutta. Kaksikiskojärjestelmä onkin varteenotettava vaihtoehto kohteessa, jossa sähkönjakelun jatkuvuus on erityisen tärkeää. Pääkiskojen lisäksi kokoojakiskostojärjestelmässä voi olla apukisko, joka helpottaa esimerkiksi katkaisijoiden huoltamista ja vähentää niistä seuraavia käyttökeskeytyksiä. (8, s. 1–4.)

3.2 Katkaisijat

Katkaisija on kytkinlaite, joka kykenee katkaisemaan ja kytkemään virtapiiriin kuormitettuna. Katkaisijan on kyettävä katkaisemaan oikosulkuvirta mahdollisessa oikosulkutilanteessa. (5, s. 39.) Kun katkaisija avataan kuormitettuna, sen koskettimien väliin syttyy valokaari, joka sammutetaan sitä ympäröivän väliaineen avulla. Katkaisijat voidaankin jakaa valokaaren sammutuksessa käytetyn väliaineen perusteella eri katkaisijatyyppeihin, joita ovat ilmakatkaisijat, öljykatkaisijat, vähäöljykatkaisijat, paineilmakatkaisijat, SF₆-katkaisijat ja tyhjökatkaisijat. (2, s. 13.) Nykyiset keskijännitekojeistot varustetaan yleensä SF₆- tai tyhjökatkaisijoilla, kun taas vanhat laitteistot on usein varustettu vähäöljy- tai paineilmakatkaisijoilla. (5, s. 39.)

SF₆-katkaisijan koskettimet ovat rikkiheksafluoridia sisältävässä säiliössä, eivätkä ne siis ole tekemisissä ilman hapen kanssa, jolloin koskettimien hapettumista ei tapahdu. Rikkiheksafluoridi on kemiallisesti stabiili, sähköisesti hyvin kestävä palamaton ja myrkytön kaasu, joka ei vanhene, eikä sitä sen seurauksena tarvitse vaihtaa. (9, s. 128.)

Tyhjökatkaisijan koskettimet ovat hermeettisesti suljetussa tyhjöputkessa. Koska tyhjöputkessa ei ole ilmaa eikä sen seurauksena happea, eivät koskettimet hapetu. (5, s. 40.) Tyhjökatkaisijan katkaisukyky perustuu tyhjöputken matalaan paineeseen, jossa ilman sähkölujuus on hyvä. (2, s. 14.)

Vähäöljykatkaisijan kukin napa on omassa pienessä sammutuskammiossaan. Kussakin sammutuskammiossa on pieni määrä öljyä, joka valokaaren syttyessä koskettimien väliin höyrystyy ja muodostaa korkean, jopa 10 MPa:n paineen. Tämä paine aiheuttaa kammiossa virtauksen, joka ohjataan puhaltamaan voimakkaasti valokaareen. Puhalluksen seurauksesta valokaari sammuu. (9, s. 129–130.)

Paineilmakatkaisijassa valokaaren katkaiseminen tapahtuu nimensä mukaisesti paineilmalla. Katkaisijaa myös ohjataan paineilmalla. Valokaaren sammumisen jälkeen katkaisijaan liittyvä erotinosa avautuu ja muodostaa luotettavan katkaisuvälin. Tämän jälkeen paine laskee ja jousivoima sulkee katkaisijaosan. Virtapiirin takaisinkytkentä tapahtuu erotinosan sulkemisella. Paineilmakatkaisijoita on käytössä ainoastaan vanhoissa asennuksissa. (9, s. 130.)

3.3 Erottimet

Erotrin on mekaaninen kytkinlaite, jota käytetään sähköverkon eri osien erottamiseen. Erottimet voidaan jakaa käyttötarkoituksensa ja rakenteensa mukaan tavalliseen erottimeen, kuorman- ja varokekuormanerottimeen sekä maadoituserottimeen. Erottimia ohjataan joko käsin, paineilmalla tai moottorilla. (9, s. 131–132.) Kiinni-asennossa erottimen on kyettävä johtamaan kuormitus- ja oikosulkuvirta, ja sen on kestävä samat rasitukset kuin siihen liitettyjen johtojen tai kiskostojen. Ollessaan auki-asennossa erottajan koskettimien on muodostettava luotettava avausväli, joka on nähtävissä selvänä ilmarakona tai erottimen asento on muuten ilmaistava selkeästi, yksiselitteisellä tavalla. Avausvälin luotettavuus edellyttää, ettei erotin tai käyttölaite kytkeydy itsestään auki- tai kiinni-asentoon tuulen, painovoiman, värinän, iskun tai tahattoman kosketuksen seurauksena.

(5, s. 38.) Jotta vältetään erottimen ohjaamista vahingossa tai virrallisena, voidaan se lukita molempiin ääriasentoihinsa joko sähköisesti tai mekaanisesti (9, s. 131).

Tavallisen erottimen ei kytkimestä poiketen tarvitse kyetä kytkemään tai katkaisemaan jännitteellistä tai virrallista piiriä. Sen tehtävänä on ainoastaan erottaa jo valmiiksi muilla keinoin, esimerkiksi kytkimellä, jännitteettömäksi tehty verkko luotettavasti. Tavallista erotinta käytetään esimerkiksi erottamaan laite jännitteellisestä piiristä huollon ajaksi (erotus- ja takaisinkytkemishetkellä erottimen oltava kuitenkin jännitteetön) sekä jakamaan sähköverkko osiin erottamalla niitä yhdistävän virtapiirin. (5, s. 38.) Tavallinen erotin on usein rakenteeltaan kaksoisveitsirakenteinen, jossa kaksoisveitsi jousien vaikutuksesta puristuu koskettimien kylkiin (9, s. 131).

Kuormanerotinta on täydennetty tavalliseen erottimeen verrattuna kipinäveitsillä ja sammutuskammioilla, joiden ansiosta sillä voidaan erottaa sen nimellisvirran suuruinen virta. Kun kuormanerotin avataan virrallisena, pääveitset avautuvat ensin, minkä seurauksena virta kulkee hetkellisesti kipinäveitsien kautta. Heti tämän jälkeen myös kipinäveitset avautuvat sammutuskammioissaan synnyttäen valokaaren. Sammutuskammioiden ansiosta valokaari kuitenkin sammuu kipinäveitsien edelleen avautuessa. Kun kuormanerotin suljetaan jännitteisenä, sulkeutuvat pääveitset ennen kipinäveitsiä. Kuormanerotimia käytetään erottamaan kuormitusvirrallisia verkkoja toisistaan sekä korvaamaan tavallisia erottimia paikoissa, joissa erottimien virheellinen ohjaus on vaarana. (9, s. 132.)

Varokekuormanerotinta on täydennetty edelleen kuormanerottimeen verrattuna varokeosalla. Varokeosa koostuu varokepitimillä ja laukaisunastoilla varustetuista sulakkeista sekä sulakkeen palamisesta toimivasta laukaisulaitteistosta. Laukaisulaitteisto toimii siten, että jo yhden sulakkeen palaessa erottimet katkaisevat virtapiirin, eikä laukaisulaitteisto salli erottimien sulkemista niin kauan, kuin yksikin varokekuormanerotin sulakkeista on palanut ja vaihtamatta. Varokekuormanerotimia käytetään kytkinlaitteina sekä esimerkiksi jakelumuuntajien oikosulkusuojina. (9, s. 132.)

Maadoituserottimen käyttötarkoituksena on jännitteettömän johdon tai kiskon työmaadoittaminen. Sen ohjaus on hoidettu niin, ettei sitä saa kytketyksi jännitteeseen kiskoon. (9, s. 132.)

4 MUUNTAMO

Muuntamoksi kutsutaan muuntajan tai useampien muuntajien sekä niihin liittyvien ylä- ja alajännittekojeistojen muodostamaa kokonaisuutta (8, s. 25). Muuntamoita on eri jännitetasoille, ja 20 kV:n keskijännitteen 400 V:n pienjännitteeksi muuttavia muuntamoita kutsutaan yleisesti jakelumuuntamoiksi (5, s. 47). Muuntamot voidaan jakaa eri tyyppeihin niiden sijainnin ja rakenteen perusteella. Rakennuksen sisälle sijoitettua muuntamoa kutsutaan sisämuuntamoksi tai vaihtoehtoisesti kiinteistömuuntamoksi. Puistomuuntamoksi kutsutaan muuntamorakennetta, jossa muuntaja kojeistoineen on sijoitettu rakennuksen ulkopuolelle, erilliseen rakennukseen. Lisäksi maaseudun ja kaupunkien haja-asutusalueiden sähkönjakelussa käytetään yleisesti sähköpylvääseen sijoitettavaa pylväsmuuntamoa (5, s. 48).

4.1 Sisämuuntamo

Sisämuuntamo on rakennuksen sisälle erityisiin muuntamotiloihin sijoitettu, maakaapeliverkkoon liitettävä muuntamo (5, s. 48). Sisämuuntamotilat ovat yleensä kiinteistön omistamia ja jakeluverkkoyhtiö vuokraa ne omaan käyttöön. Sisämuuntamon kokoa ja sijaintia suunniteltaessa on otettava huomioon muuntamon tilantarve ja kulkuyhteydet sekä kaapeleiden reitit sisään ja ulos muuntamosta. (5, s. 60–61.) Muuntajakoot sisämuuntamoissa ovat 200...1600 kVA (5, s. 48).

Rakennuksen sisälle sijoitetun muuntamon tulee täyttää ympäristöministeriön julkaisun E1 vaatimukset rakennusten paloturvallisuudesta (5, s. 60). Tämä asettaa tiettyjä vaatimuksia esimerkiksi muuntamon kaapeliläpivienteihin sekä muihin palo-osastointiin ja paloturvallisuuteen liittyviin seikkoihin (10, s. 1–2). Vaatimustaso määräytyy muuntamossa olevien materiaalien ja rakenteiden aiheuttaman palokuorman mukaan, minkä vuoksi käytettäessä öljymuuntajaa muuntajaöljyllä on ratkaiseva vaikutus palokuorman suuruuteen ja täten muuntamon paloturvallisuuteen (5, s. 49).

On myös hyvä tiedostaa, että rakennuksen sisälle sijoitetut muuntajat voivat joissain tapauksissa aiheuttaa haitallisia magneettikenttiä ympäröiviin tiloihin, jolloin etenkin herkkien elektronisten laitteiden toiminta voi häiriintyä (11, s. 2).

4.2 Puistomuuntamo

Puistomuuntamo liitetään useimmiten maakaapeliverkkoon, mutta se on tarvittaessa mahdollista liittää myös avojohtoverkkoon (liitettä omalla keskijännitekaapelilla) (5, s. 48). Puistomuuntamosa muuntaja kojeistoineen on sijoitettu omaan muuntamorakennukseensa, joka on usein tehdasvalmisteinen valmismuuntamo. Se koostuu perinteisesti keskijännite-, muuntaja- ja pienjänniteiloista. Puistomuuntamo voi olla rakenteeltaan joko sisältä hoidettava, jolloin siinä tulee olla hoitokäytävä, tai ulkoa hoidettava päättävä muuntamo, jonka huolto- ja hoitotyöt tehdään ulkoa käsin, eikä siis hoitokäytävää tarvita. (5, s. 65–66.)

Verrattuna sisämuuntamoon puistomuuntamossa palovaaran, melun ja magneettikenttien hallitseminen on huomattavasti helpompaa. Tyypillisesti puistomuuntamoiden muuntajakoot ovat 100...1000 kVA. (5, s. 48.)

Puistomuuntamon vähimmäisetäisyydeksi muista rakennuksista suositellaan vähintään viittä metriä. Mikäli muuntamon lähellä oleva rakennus on kuitenkin arvokas tai muuntamo voi vaarantaa henkilöturvallisuutta, on etäisyyden kasvattamista hyvä harkita paloviranomaisten kanssa. Toisaalta erityisehdoilla muuntamo on mahdollista rakentaa myös lähemmäksi rakennuksia. (5, s. 49.)

4.3 Pylväsmuuntamo

Pylväsmuuntamo on yleisin jakelumuuntamotyyppi Suomessa sen nopean rakentamisen, hyvän käyttövarmuuden sekä muihin muuntamorakenteisiin verrattuna pienempien rakennus- ja käyttökustannusten ansiosta (5, s. 48). Pylväsmuuntamoa käytetään avojohtoverkoissa, ja muuntaja asennetaan yhden tai kahden pylvään varaan. Usein pylväsmuuntamon pylväät toimivat myös muuntajaan tulevien ja siitä lähtevien johtojen kannatinpylväinä. (5, s. 71–72.) Pylväsmuuntamon mahdollisia käyttökohteita rajoittavat sen vaatimat ilmajohtoyhteydet sekä siinä käytettävät suhteellisen pienet muuntajakoot 16...500 kVA (5, s. 48).

5 OIKOSULKUVIRTA JA -IMPEDANSSI

Oikosulku on tilanne, jossa kaksi potentiaaliltaan erisuurta tai erivaiheista johdinta tai rakennetta ovat pienen impedanssin kautta yhteydessä. Oikosulkuvirrat ovat yhteyden pienen impedanssin vuoksi huomattavasti nimellisvirtoja suurempia. (12, s. 117.) Jotta sähköverkko laitteineen ja suojausineen voidaan suunnitella turvallisesti, on oikosulkuvirtojen suuruudet eri tilanteissa tunnettava ja hallittava. (13, s. 266.) Suuret oikosulkuvirrat aiheuttavat verkolle ja sen komponenteille dynaamisia ja termisiä rasituksia, joita kutsutaan välittömiksi vaikutuksiksi. Myös välilliset vaikutukset, kuten valokaari-ilmiöt voivat aiheuttaa verkolle ja sen komponenteille vahinkoa. (12, s. 117.) Etenkin teollisuuden jakeluverkoissa, joissa on tehokkaita muuntajia ja sähkömoottoreita, ja etäisyydet ovat pieniä, oikosulkuvirrat voivat kasvaa erityisen suuriksi (14, s. 1). Oikosulun tyyppilisiä aiheuttajia ovat eristeiden likaantuminen, kostuminen, vanheneminen ja mekaaninen haurastuminen, korjaus- ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä asetettujen maadoitusjohtimien unohtuminen paikalleen, ylijännitteen aiheuttamat läpilyönnit ja valokaaret sekä puun oksat ja linnut avojohdoilla. (14, s. 1 ja 12, s. 117.)

Oikosulkusuojaus pyritään järjestämään siten, että oikosulkuvirta saadaan katkaistua mahdollisimman nopeasti ja selektiivisesti niin, että mahdollisimman pieni osa verkkoa erotetaan sähkönsyötöstä. Vaikka vian selvittämiseen voi mennä aikaa, ja vikapaikka on pidettävä jännitteettömänä, tulisi vikapaikan takana olevalle verkolle pyrkiä järjestämään sähkönsyöttö vaihtoehtoista reittiä pitkin. Mikäli oikosulkuvirta aiheuttaa vaurioita muuallakin kuin alkuperäisessä vikapaikassa, on laitteiston oikosulkulujuus ylittynyt. Tällöin on syytä epäillä, että verkostosuunnittelussa tai sähköverkon toteutuksessa on sattunut virhe. (12, s. 117.)

Kolmivaiheisessa verkossa voi syntyä useita erilaisia oikosulkuja. Oikosulun tyyppi määräytyy siitä, minkä johtimien välille oikosulku pääsee muodostumaan. Kaikkien kolmen vaiheen ollessa keskenään oikosulussa puhutaan kolmivaiheisesta oikosulusta. Vastaavasti kahden vaiheen ollessa keskenään oikosulussa on kyseessä kaksivaiheinen oikosulku. (12, s. 117.) Yksivaiheisessa oikosulussa vaihe ja nollajohto ovat oikosulussa, kun taas vaihejohtimen ja maan (suojavaadoitusjohtimen, maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan) ollessa keskenään oikosulussa, on kyseessä maasulku (15, s. 1).

5.1 Theveninin menetelmä

Vikakohdan oikosulkuvirran voidaan ajatella koostuvan useasta eri osavirrasta. Syöttöverkon lisäksi oikosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja ovat verkkoon kytketyt tahtikoneet ja epätahtimootorit. Suurin osa oikosulkuvirrasta muodostuu verkon ja mahdollisten generaattoreiden syöttämänä, mutta myös tahti- ja epätahtimootoreiden syöttämä oikosulkuvirta on otettava huomioon, etenkin tutkittaessa oikosulun alkutilannetta. (14, s. 15.)

Kun teollisuussähköverkon oikosulkuvirrat halutaan laskea tarkasti, käytetään yleisesti Theveninin menetelmää. Tämä mahdollistaa vikapaikan oikosulkuvirran laskemisen helpommin, kuin esimerkiksi Ohmin ja Kirchhoffin lakeja soveltamalla. Theveninin menetelmässä oikosulkutilannetta tarkastellaan siten, että eri oikosulkulähteiden sähkömotoriset voimat korvataan yhdellä vikapaikkaan sijoitetulla sähkömotorisella voimalla, Theveninin jännitelähteellä. Tämän jännitelähteen kanssa sarjassa on Theveninin impedanssi, jonka muodostavat kaikkien vikavirtaa syöttävien lähteiden sekä verkon muiden komponenttien oikosulkuimpedanssit. (14, s. 8–9.)

Kolmivaiheinen, symmetrinen oikosulku on oikosulkulaskujen perustapaus. Tällöin esiintyy ainoastaan myötäimpedansseja eli komponenttien tavallisia oikosulkuimpedansseja. Mikäli sen sijaan lasketaan virtoja kaksivaiheisessa oikosulussa tai maasulussa, joudutaan verkon osille muodostamaan myös nolla- ja vastaimpedanssit. Seuraavilla kaavoilla voidaan laskea kolmivaiheisen (kaava 3), kaksivaiheisen (kaava 4) sekä yksivaiheisen oikosulun (kaava 5) oikosulkuvirrat. Jännitekerroimen c avulla otetaan huomioon sähkömotorististen voimien ja verkon nimellisjännitteen ero. Kuten taulukosta 3 voidaan huomata, jännitekerroimen suuruus riippuu verkon nimellisjännitteestä sekä siitä, lasketaanko suurinta vai pienintä oikosulkuvirtaa. (14, s. 9–12.)

$$\bar{I}_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1}$$

KAAVA 3

I_{k3} = kolmivaiheinen oikosulkuvirta

c = jännitekerroin

U_n = verkon nimellispääjännite

Z_1 = oikosulkupiirin myötäimpedanssi

$$\bar{I}_{k2} = \frac{cU_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1}} \cdot \bar{I}_{k3} \quad \text{KAAVA 4}$$

I_{k2} = kaksivaiheinen oikosulkuvirta

Z_2 = oikosulkupiirin vastaimpedanssi

$$\bar{I}_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{3}{1 + \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1}} \cdot \bar{I}_{k3} \quad \text{KAAVA 5}$$

I_{k1} = yksivaiheinen oikosulkuvirta

Z_0 = oikosulkupiirin nollaimpedanssi

TAULUKKO 3. Jännitekertoimet eri nimellisjännitteille laskettaessa suurinta (c_{max}) tai pienintä (c_{min}) oikosulkuvirtaa (14, s. 9)

Nimellisjännite U_n		c_{max}	c_{min}
Pienjännite (100–1000 V)	230/400 V	1,00	0,95
	Muut pienjännitteet	1,05	1,00
Keskijännite (1–35 kV)		1,10	1,00
Suurjännite (35–230 kV)		1,10	1,00

Pienjänniteverkkojen oikosuluissa oikosulkupiirin vastaimpedanssi on myötäimpedanssin suuruinen, kun kaavan 6 ehto täyttyy (14, s. 12 ja 16, s. 21).

$$X_{k,m} \geq 2X_{k,v} \quad \text{KAAVA 6}$$

$X_{k,m}$ = muuntajan oikosulkureaktanssi

$X_{k,v}$ = syöttävän verkon oikosulkureaktanssi (samassa jännitetasossa, kuin $X_{k,m}$)

Mikäli kaavan 6 ehto täyttyy, kaavat 4 ja 5 voi ilmaista kaavoina 7 ja 8 (14, s. 12).

$$\bar{I}_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \bar{I}_{k3} \quad \text{KAAVA 7}$$

$$\bar{I}_{k1} = \frac{3}{2 + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1}} \cdot \bar{I}_{k3} \quad \text{KAAVA 8}$$

5.2 Mitoituksessa käytettävät oikosulkusuureet

Oikosulkuvirta koostuu vaihto- ja tasavirtakomponentista. Oikosulkuvirran tasavirtakomponentin suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä eli jännitteen vaihekulmasta nollakohdasta laskettuna. (14, s. 2–3.) Oikosulkuvirran suuruus muuttuu sen kestoajan suhteen, ja se voidaan jakaa useaan eri osaan tilansa mukaan. (13, s. 266–267.) Oikosulun syntyhetkellä voidaan havaita alkuoikosulkuvirta I''_k , joka on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvo. Sitä ei itsessään käytetä suojauksen ja mitoituksen perusteena, vaan sen avulla määritellään muita oikosulkuvirtoja. Alkuoikosulkuvirran suuruus voidaan laskea kaavoilla 3, 4 ja 5 käyttämällä oikosulkupiirin impedansseina komponenttien alkuimpedanssiarvoja. (14, s. 23.)

Suurimman huippuarvonsa oikosulkuvirta saavuttaa noin 10 ms:n kuluttua oikosulun tapahtumisesta. Tätä virtaa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi i_s , jota käytetään laitteiden mekaanisen mitoituksen perusteena. Sen suuruus on laskettavissa kaavalla 9. (14, s. 23.)

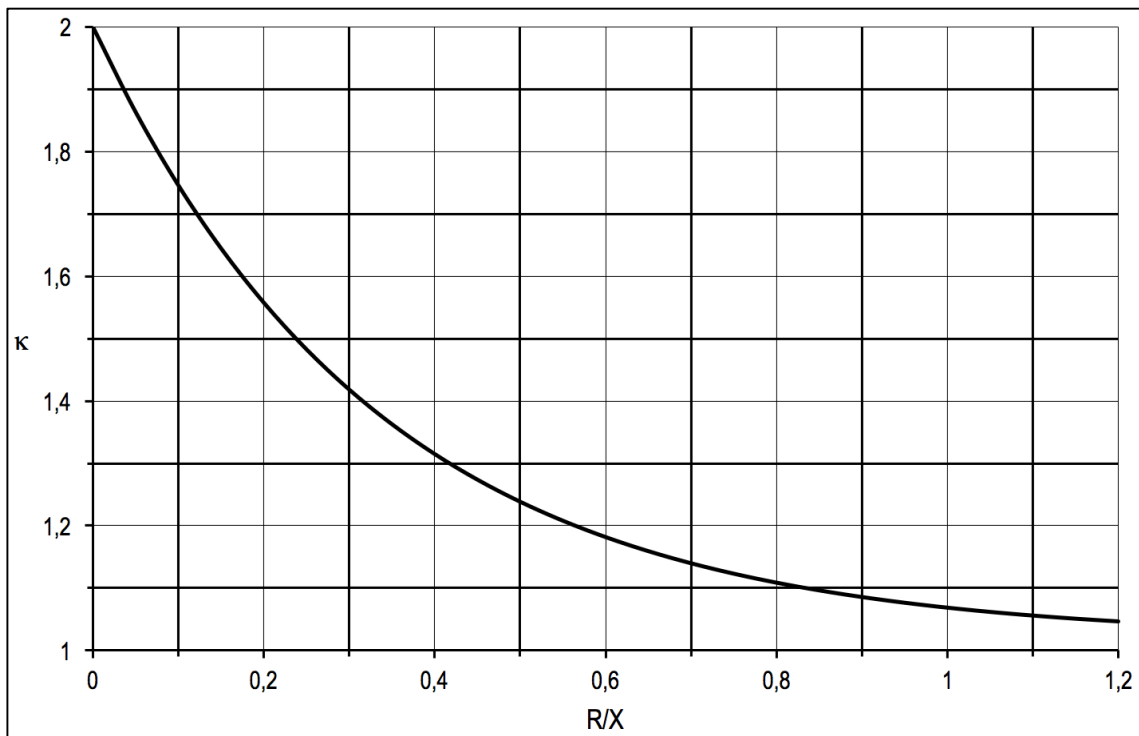
$$\bar{i}_s = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad \text{KAAVA 9}$$

κ = sysäyskerroin

I''_k = alkuoikosulkuvirta (tehollisarvo)

Sysäyskerroin κ on riippuvainen oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta. Se on laskettavissa kaavan 10 avulla, tai vaihtoehtoisesti se voidaan määrittää kuvan 7 mukaan (14, s. 24).

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-\frac{3R}{X}} \quad \text{KAAVA 10}$$



KUVA 7. Sysäyskertoimen riippuvuus oikosulkuvirtapiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta

Mikäli resistanssin ja reaktanssin tarkkoja arvoja ei ole tiedossa, voidaan pienjänniteverkossa sysäyskerroin arvioida alkuoikosulkuvirran avulla taulukosta 4 (14, s. 24).

TAULUKKO 4. Sysäyskerroin pienjänniteverkossa alkuoikosulkuvirran mukaan

I'_{k}	κ	$\cos\varphi$
$\geq 10 \text{ kA}$	1,2	0,50
10–20 kA	1,4	0,30
20–50 kA	1,5	0,25
$< 50 \text{ kA}$	1,6	0,20

Mikäli oikosulkuvirran syöttölähteitä on useampia eivätkä ne ole toisistaan riippuvaisia, voidaan vikakohdan kokonaissysäys-oikosulkuvirta $i_{s,kok}$ laskea summaamalla eri lähteiden sysäys-oikosulkuvirrat keskenään kaavalla 11 (14, s. 24).

$$\bar{i}_{s,kok} = \bar{i}_{s1} + \bar{i}_{s2} + \dots + \bar{i}_{sn}$$

KAAVA 11

i_{s1} = ensimmäisen lähteen syöttämä sysäysaikosulkuvirta

i_{s2} = toisen lähteen syöttämä sysäysaikosulkuvirta

i_{sn} = n:n lähteen syöttämä sysäysaikosulkuvirta

Ajan kuluessa oikosulkuvirran tasavirtakomponentti vaimenee nopeudella, joka riippuu sähköverkon rakenteesta. Myös vaihtovirtakomponentti vaimenee, mikäli tahti- tai epätahtikoneiden syöttämä oikosulkuvirta muodostaa merkittävän osan oikosulkuvirrasta. Tämä on seurausta koneiden sisäisten impedanssien kasvamisesta oikosulun edetessä. Kun tasa- ja vaihtovirtakomponentit ovat vaimentuneet pysyvään tilaansa, on kyseessä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k . Toisin kuin alkuoikosulkuvirralla, pysyvän tilan oikosulkuvirralla ei voida laskea tarkkaa arvoa, sillä se riippuu mm. muuntajien automaattisesta jännitteensäädöstä ja verkon kytkentätilanteiden muutoksista oikosulun aikana. Verkon oikosulkukestoisuuden kannalta on hyvä tietää suurin pysyvän tilan oikosulkuvirta. Pienintä mahdollista pysyvän tilan oikosulkuvirtaa ei yleensä ole tarpeellista selvittää, sillä verkon oikosulkusuojat toimivat suurimmassa osassa tapauksista, ennen kuin pysyvän tilan oikosulkuvirta saavutetaan. (14, s. 4–5 ja 25.)

5.3 Syöttöverkko

Syöttöverkko syöttää oikosulkuun suuren osan oikosulkuvirrasta. Verkkoyhtiöltä saadaan usein kysymällä selville joko syöttävän verkon kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta $I''_{k3,v}$ tai verkon näennäinen alkuoikosulkuteho $S''_{k,v}$. Näiden tunnuslukujen avulla on mahdollista laskea verkon oikosulkuimpedanssi Theveninin menetelmää varten kaavalla 12. Jännitekerroin on erisuuruinen lasettaessa suurinta ja pienintä oikosulkuvirtaa. (14, s. 15.)

$$Z_{k,v} = \frac{cU_n^2}{S''_{k,v}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I''_{k3,v}}$$

KAAVA 12

$Z_{k,v}$ = syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi

c = jännitekerroin (taulukosta 3)

U_n = syöttävän verkon nimellispääjännite

$S''_{k,v}$ = syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho

$I''_{k3,v}$ = syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

Mikäli tiedetään vain syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta, verkon näennäinen alkuoikosulkuteho on laskettavissa kaavalla 13.

$$S''_{k,v} = \sqrt{3}U_n \cdot I''_{k3,v} \quad \text{KAAVA 13}$$

Syöttävän verkon impedanssi voidaan jakaa resistanssi- ja reaktanssiosaan kaavoilla 14 ja 15 (14, s. 16).

$$X_{k,v} = 0,995 \cdot Z_{k,v} \quad \text{KAAVA 14}$$

$X_{k,v}$ = syöttävän verkon reaktanssi

$$R_{k,v} = 0,1 \cdot X_{k,v} \quad \text{KAAVA 15}$$

$R_{k,v}$ = syöttävän verkon resistanssi

Mikäli oikosulku tapahtuu pienjännitepuolella lähellä muuntajaa, syöttävän verkon impedanssia ei tarvitse huomioida oikosulkuvirtaa laskettaessa, jos $S''_{k,v} > 400S_n$ (14, s. 16).

5.4 Muuntaja

Sähköverkkoja tarkasteltaessa muuntaja kuvataan usein oikosulkuimpedanssina $Z_{k,m}$, joka muodostuu kaavan 16 mukaan muuntajan oikosulkuresistanssista ja -reaktanssista (17, s. 75).

$$\bar{Z}_{k,m} = R_{k,m} + jX_{k,m} \quad \text{KAAVA 16}$$

$Z_{k,m}$ = muuntajan oikosulkuimpedanssi

$R_{k,m}$ = muuntajan oikosulkuresistanssi

$X_{k,m}$ = muuntajan oikosulkureaktanssi

Muuntajien kilpiarvoissa ei yleensä ilmoiteta suoraan muuntajan oikosulkuimpedanssia. Sen sijaan kilpiarvona on usein ilmoitettu muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi z_k . Tämän prosenttiluvun avulla muuntajan oikosulkuimpedanssi on laskettavissa kaavalla 17. Mikäli impedanssi halutaan laskea ensiöpuolelta, käytetään jännitteenä ensiön nimellisjännitettä, kun taas toisio-
puolelle laskettaessa käytetään toisio-
nimellisjännitettä. (2, s. 8.)

$$Z_{k,m} = \frac{z_k U_n^2}{S_n}$$

KAAVA 17

$Z_{k,m}$ = muuntajan oikosulkuimpedanssi

z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

U_n = nimellispääjännite (sillä tasolla, jolla oikosulkuimpedanssi halutaan laskea)

S_n = muuntajan nimellisteho

Muuntajan kilpiarvoissa ilmoitetaan useimmiten myös muuntajan nimelliset kuormitushäviöt P_{kn} (kuparihäviöt nimellisvirralla). Nimellisten kuormitushäviöiden ja muuntajan nimellistehon avulla voidaan laskea muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi r_k kaavalla 18. (2, s. 8.)

$$r_k = \frac{P_{kn}}{S_n}$$

KAAVA 18

r_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi

P_{kn} = muuntajan nimelliset kuormitushäviöt

S_n = muuntajan nimellisteho

Suhteellisen oikosulkuresistanssin avulla voidaan laskea muuntajan oikosulkuresistanssi $R_{k,m}$ kaavalla 19 (2, s. 8).

$$R_{k,m} = \frac{r_k U_n^2}{S_n}$$

KAAVA 19

$R_{k,m}$ = muuntajan oikosulkuresistanssi

r_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi

U_n = nimellispääjännite (sillä tasolla, jolla oikosulkuresistanssi halutaan laskea)

S_n = muuntajan nimellisteho

Suhteellinen oikosulkureaktanssi x_k voidaan laskea suhteellisen oikosulkuimpedanssin ja suhteellisen oikosulkuresistanssin avulla edelleen kaavalla 20 (2, s. 8).

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

KAAVA 20

x_k = muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi

z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

r_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi

Suhteellisen oikosulkureaktanssin avulla voidaan laskea muuntajan oikosulkureaktanssi $X_{k,m}$ kaavalla 21 (2, s. 8).

$$X_{k,m} = \frac{x_k U_n^2}{S_n}$$

KAAVA 21

$X_{k,m}$ = muuntajan oikosulkureaktanssi

x_k = muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi

U_n = nimellispääjännite (sillä tasolla, jolla oikosulkureaktanssi halutaan laskea)

S_n = muuntajan nimellisteho

Muuntajan nolaresistanssi R_{m0} ja -reaktanssi X_{m0} saadaan taulukosta 5 muuntajan nimellistehon perusteella (7, s. 37).

TAULUKKO 5. 20/0,4 kV -jakelumuuntajien resistanssit ja reaktanssit nimellistehon mukaan.

TEHO	R_m		X_m		R_{m0}	X_{m0}
kVA	%	Ω	%	Ω	Ω	Ω
30	3,0	0,160	2,6	0,14	0,070	0,0093
50	2,6	0,083	3,0	0,097	0,087	0,0980
100	2,0	0,031	3,5	0,056	0,033	0,0570
200	1,4	0,011	3,7	0,030	0,012	0,0310
315	1,3	0,0065	4,2	0,021	0,007	0,0220
500	1,1	0,0037	4,4	0,014	0,0041	0,0140
800	0,89	0,0018	4,6	0,0092	0,0021	0,0096
1000	0,92	0,0015	4,9	0,0079	0,0018	0,0083
1250	0,84	0,0011	5,9	0,0076	0,0014	0,0081
1600	0,79	0,0008	5,9	0,0060	0,0011	0,0064
2000	0,73	0,0006	6,0	0,0048	0,0008	0,0052

5.5 Johdot ja kiskostot

Teollisuuden keskijännitejohdotukset ovat yleensä niin lyhyitä, etteivät ne vaikuta juurikaan oikosulkupiirin impedanssiin. Pienjänniteverkossa sen sijaan oikosulkuvirrat kasvavat usein suuremmiksi, jolloin lyhyempienkin johdotusten vaikutus oikosulkupiirin impedanssiin on syytä huomioida. Käytettyjen kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot saadaan suoraan kaapelivalmistajalta. Resistanssit ja reaktanssit ilmoitetaan pituuteen suhteutettuna, jolloin kaapelin impedanssi Z_j on laskettavissa kaavalla 22. (14, s. 20.)

$$\bar{Z}_j = (r + jx) \cdot l$$

KAAVA 22

r = kaapelin tasavirtaresistanssi (+20 °C) pituusyksikköä kohti

x = kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

l = kaapelin pituus

Kiskostojen katsotaan yleisesti olevan niin lyhyitä ja pieni-impedanssisia, ettei niitä tarvitse huomioida oikosulkuvirtalaskelmissa (14, s. 21).

5.6 Moottorit

Verkkoon kytketyistä kuormista tahti- ja epätahtimoottorit kasvattavat oikosulkuvirtaa (14, s. 15). Oikosulun syntyhetkellä jännite putoaa ja moottorit toimivat hitausmomenttinsa seurauksena lyhyen aikaa generaattoreina. Nopeussäätölaitteilla, kuten taajuusmuuttajilla, ohjattavat moottorit sen sijaan eivät tuota oikosulkuvirtaa, sillä ohjainlaite kuluttaa moottorin luoman generaattoritehon häviöinä moottorin käämityksissä. (13, s. 268–269.)

Tahtimoottoreiden reaktanssit X_{tm} voidaan määrittää kaavan 23 avulla (14, s. 17).

$$X_{tm} = \frac{x \cdot U_n^2}{S_n}$$

KAAVA 23

x = suhteellinen alkuperäinen, muutos- tai tahtireaktanssi

U_n = moottorin nimellispääjännite

S_n = moottorin nimellinäennäisteho

Laskettaessa tahtimoottoreiden aiheuttamaa sysäys-oikosulkuvirtaa, voidaan käyttää oikosulkuvirran vaimenemisen huomioon ottavia fiktiivisiä generaattorin resistanssiarvoja, jotka käyvät ilmi taulukosta 6 (14, s. 17).

TAULUKKO 6. Tahtimoottoreiden fiktiiviset resistanssi–reaktanssi-suhteet moottorin nimellisjännitteen U_n ja nimellinäennäistehon S_n mukaan

U_n	S_n	R_d/X''_d
>1 kV	≥ 100 MVA	0,05
>1 kV	<100 MVA	0,07
≤ 1 kV	Kaikki	0,15

Epätahtimoottorit ovat selvästi yleisimpiä sähkökoneita teollisuuslaitoksissa. Symmetrisissä vioissa ne vaikuttavat pääasiassa alku- ja sysäys-oikosulkuvirran suuruuteen, kun taas epäsymmetrisissä vikatapauksissa niiden vaikutus ulottuu myös pysyvän tilan oikosulkuvirtaan. Useimmiten epätahtimoottorit ovat tehoiltaan pieniä, mutta niiden suuren määrän vuoksi ne on huomioitava oikosulkuvirtalaskelmissa. Mallinnettaessa pienjännitemoottoreita niistä muodostetaan muuntaja-kohtaiset ekvivalenttimoottorit. Epätahtimoottorin sekä ekvivalenttimoottorin oikosulkuimpedanssi Z_{em} on laskettavissa kaavalla 24. (14, s. 19.) Oikosulkumoottorin käynnistysvirta on tavallisesti 5–7 kertainen nimellisvirtaan verrattuna (18, s. 6).

$$Z_{em} = \frac{U_n^2}{I_s/I_n \cdot S_n}$$

KAAVA 24

U_n = moottorin nimellispääjännite

I_s = moottorin käynnistysvirta

I_n = moottorin nimellisvirta

S_n = moottorin nimellinäennäisteho

Kaavasta 24 saatava oikosulkuimpedanssi on jaettavissa resistanssiksi ja reaktanssiksi taulukon 7 kertoimien avulla (14, s. 19).

TAULUKKO 7. Epätahtimoottoreiden oikosulkuresistanssin R_{em} , -reaktanssin X_{em} ja -impedanssin Z_{em} välisiä suhteita, moottorin nimellisjännitteen U_n , nimellispäätötehon P_n ja napapari-luvun p mukaan

U_n	P_n/p	R_{em}/X_{em}	X_{em}/Z_{em}
≥ 1 kV	≥ 1 MW	0,10	0,995
≥ 1 kV	< 1 MW	0,15	0,989
< 1 kV	Kaikki	0,42	0,922

5.7 Vikaimpedanssi

Laskettaessa pienintä verkossa esiintyvää oikosulkuvirtaa on otettava huomioon oikosulkukohdan mahdollinen vikaimpedanssi. Mikäli vikakohtaan jää palamaan valokaari tai oikosulkupiiri sulkeutuu esimerkiksi kaapelihyllyn kautta, vikaimpedanssi on merkittävän suuri, etenkin pienjänniteverkossa. Vikaimpedanssin suuruuden tarkka matemaattinen määrittäminen on haastavaa, joten se huomioidaan kertoimella, jolla kerrotaan verkon pienin galvaanisesti esiintyvä oikosulkuvirta. Kyseinen kerroin c_{vi} on keskijännitteellä 0,8 ja pienjännitteellä 0,6. (14, s. 22.)

5.8 Redusointi

Kun lasketaan ja mitoitetaan sähköverkkoja sellaisessa tilanteessa, jossa on useita jänniteportaita, on huomioitava, että jänniteportaasta toiseen liikuttaessa tarkasteltavat suureet muuttuvat. Niinpä onkin tärkeää valita yksi jänniteporras, jossa tarkastelu tehdään, minkä jälkeen muiden jänniteportaiden suureet redusoidaan valittuun jänniteportaaseen. Laskennan jälkeen redusoidut suureet voidaan palauttaa haluttaessa alkuperäisiin jännitetasoihin redusoimalla uudelleen. Redusoidun suureen merkinä käytetään heittomerkkiä, mikä voi aiheuttaa väärinymmärryksiä oikosulkulaskennassa, jossa heittomerkillä kuvataan usein eri oikosulkutilanteiden virtoja. Jännitteiden redusoiminen tehdään kertomalla ne muuntajan muuntosuhteella kaavan 25 mukaisesti. (19, s. 2–3.)

$$U'_2 = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \cdot U_2$$

KAAVA 25

U'_2 = jännitetasoon U_{1n} reducedu U_{2n} -jännitetason jännite U_2

U_2 = reduceduava jännite

U_{1n} = nimellinen jännitetaso, jolle jännite U_2 reduceduadaan

U_{2n} = nimellinen jännitetaso, jolta jännite U_2 reduceduadaan

Virtojen reduceduaminen tehdään kertomalla ne muuntajan muuntosuhteen käänteisarvolla kaavan 26 mukaisesti (19, s. 3).

$$I'_2 = \frac{U_{2n}}{U_{1n}} \cdot I_2$$

KAAVA 26

I'_2 = jännitetasoon U_{1n} reducedu U_{2n} -jännitetason virta I_2

I_2 = reduceduava virta

U_{1n} = nimellinen jännitetaso, jolle virta I_2 reduceduadaan

U_{2n} = nimellinen jännitetaso, jolta virta I_2 reduceduadaan

Impedanssien, reaktanssien ja resistanssien reduceduaminen tehdään kertomalla ne muuntajan muuntosuhteen neliöllä kaavan 27 mukaisesti (19, s. 3).

$$Z'_2 = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)^2 \cdot Z_2$$

KAAVA 27

Z'_2 = jännitetasoon U_{1n} reducedu U_{2n} -jännitetason impedanssi Z_2

Z_2 = reduceduava impedanssi

U_{1n} = nimellinen jännitetaso, jolle impedanssi Z_2 reduceduadaan

U_{2n} = nimellinen jännitetaso, jolta impedanssi Z_2 reduceduadaan

6 JÄNNITTEENALENEMA JA TEHOHÄVIÖ

20 kV:n ja 400 V:n jakeluverkoissa syntyvät jännitteenalenemat on pyrittävä pitämään mahdollisimman pieninä, jottei kulutuskojeiden toiminta häiriytyisi (17, s. 84). Lähtökohtaisesti jakelu-
muuntamo olisi pyrittävä rakentamaan mahdollisimman lähelle käyttökohdetta, sillä pienjännitteel-
lä toteutettava sähkönsiirto aiheuttaa merkittävää jännitteenalenemaa ja tehohäviötä kuormitus-
virtojen ollessa suuria (5, s. 47). Pienjänniteverkon jännitteenaleneman maksimina pidetään n. 2–
3 %:a (20, s. 2). Mikäli jännitteenalenema kasvaa tätä suuremmaksi, voidaan sitä kompensoida
muuttamalla muuntajan muuntosuhdetta käämi- tai väliottokytkimillä. (17, s. 84.)

6.1 Jännitteenalenema kolmivaihejärjestelmässä

Kolmivaihejärjestelmässä syöttöjännitteiden voidaan aina olettaa olevan symmetriset. Mikäli täl-
laiseen symmetriseen kolmivaihejärjestelmään kytketään symmetrinen kolmivaihekuormitus, ei
nollajohtimessa kulje virtaa. Tällöin nollajohdossa ei synny myöskään jännitteenalenemaa. (17, s.
86.)

Pienellä kuormituksella johdon alku- ja loppupään jännitteiden välinen kulma on varsin pieni, min-
kä vuoksi loppupään jännitteen itseisarvo on likimain yhtä suuri, kuin sen alkupään jännitteen
suuntainen komponentti. Mikäli siis alkupään jännitteen U_1 ja loppupään jännitteen U_2 välinen
vaihe-ero jätetään huomioimatta, jännitteenalenema U_h voidaan laskea kaavalla 28. (21, s. 38–
39.)

$$U_h = |\bar{U}_1| - |\bar{U}_2|$$

KAAVA 28

U_h = jännitteenalenema

U_1 = alkupään jännite

U_2 = loppupään jännite

Vaihtoehtoisesti jännitteenalenema on laskettavissa myös virtojen, vaihekulman sekä resistanssin
ja reaktanssin kautta kaavoilla 29 ja 30 (21, s. 39). Laskettaessa johtojen aiheuttamaa jännitteen-
alenemaa $U_{h,j}$ käytetään resistanssina R ja reaktanssina X johtotyypille ominaisia, pituuden mu-

kaan määräytyviä resistansseja ja reaktansseja, jotka ovat saatavissa taulukkotietoina eri johtotyypeille.

$$U_h = \sqrt{3}(IR \cos \varphi + IX \sin \varphi) \quad \text{KAAVA 29}$$

I = virta

R = piirin resistanssi

X = piirin reaktanssi

φ = vaihekulma

$$U_h = \sqrt{3}(I_p R + I_q X) \quad \text{KAAVA 30}$$

I_p = virran pätökomponentti

I_q = virran loiskomponentti

Suhteellinen jännitteenalenema U'_h on laskettavissa edelleen kaavalla 31 ja 32 (21, s. 39).

$$U'_h = \frac{\sqrt{3}(I_p R + I_q X)}{U} = \frac{P \cdot (R + X \tan \varphi)}{U^2} \quad \text{KAAVA 31}$$

U'_h = suhteellinen jännitteenalenema

$$U'_h = \frac{U_h}{U_1} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad \text{KAAVA 32}$$

$$U_2 = U_1 - U'_h \cdot U_1$$

Johtojen suhteellinen jännitteenalenema on laskettavissa myös johtimelle ominaisen, tehokertoimesta riippuvaisen jännitteenalenemakertoimen avulla kaavalla 32. Jännitteenalenemakertoimet eri johtotyypeille on löydettävissä taulukoituina. (7, s. 40–41.)

$$U'_h = S l K_{Uh} \quad \text{KAAVA 32}$$

S = johdon kuormitus

l = johdon pituus

K_{Uh} = jännitteenalenemakerroin

Jännitteenalenemalaskuissa päästään yleensä riittävään tarkkuuteen käytettäessä jännitteenä alkupään jännitettä ja kuormituksena loppupään virtoja, resistansseja ja reaktansseja. Tällöin laskuissa oletetaan loppupään jännitteen olevan alkupään jännitteen suuruinen, mikä aiheuttaa pienen epätarkkuuden. Mikäli halutaan laskea jännitteenalenemaa tarkemmin, on turvauduttava iteratiivista metodiikkaa hyödyntävään tietokonelaskentaan. (21, s. 39.)

6.2 Teho- ja energiahäviö

Sähköverkossa tehohäviön suuruus määräytyy kuormitusvirran suuruuden ja sähköverkon komponenttien resistanssin mukaan. Virtapiirin kokonaisvirta saa aikaan johdon ja muuntajan pitkitäisresistanssissa pätötehohäviön P_h , joka voi olla merkittävä tekijä sähköverkon taloudellisuuslaskelmissa. (21, s. 33–34.)

3-vaihejohdossa syntyvät tehohäviöt P_h ovat laskettavissa kaavalla 33 (22, s. 6). Resistanssina R käytetään johdon resistanssia, jonka suuteen vaikuttavat johdintyyppi ja johtopituus.

$$P_h = 3 \cdot I^2 R \quad \text{KAAVA 33}$$

Muuntajan aiheuttamat häviöt voidaan jakaa tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Koska tyhjäkäyntihäviöiden suuruuteen vaikuttaa ainoastaan muuntajan jännite, on se useimmiten ilmoitettu muuntajan kilpiarvoissa. Kuormitushäviöiden suuruuteen sen sijaan vaikuttaa muuntajan kuormitus, ja kilpiarvoissa onkin yleensä ilmoitettu nimelliset kuormitushäviöt P_{kn} , joiden avulla kuormitushäviöt P_k kullakin hetkellä on laskettavissa kaavalla 34. (2, s. 9.)

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \cdot P_{kn} \quad \text{KAAVA 34}$$

P_k = muuntajan kuormitushäviöt kuormituksella S

S = muuntajan kuormitus

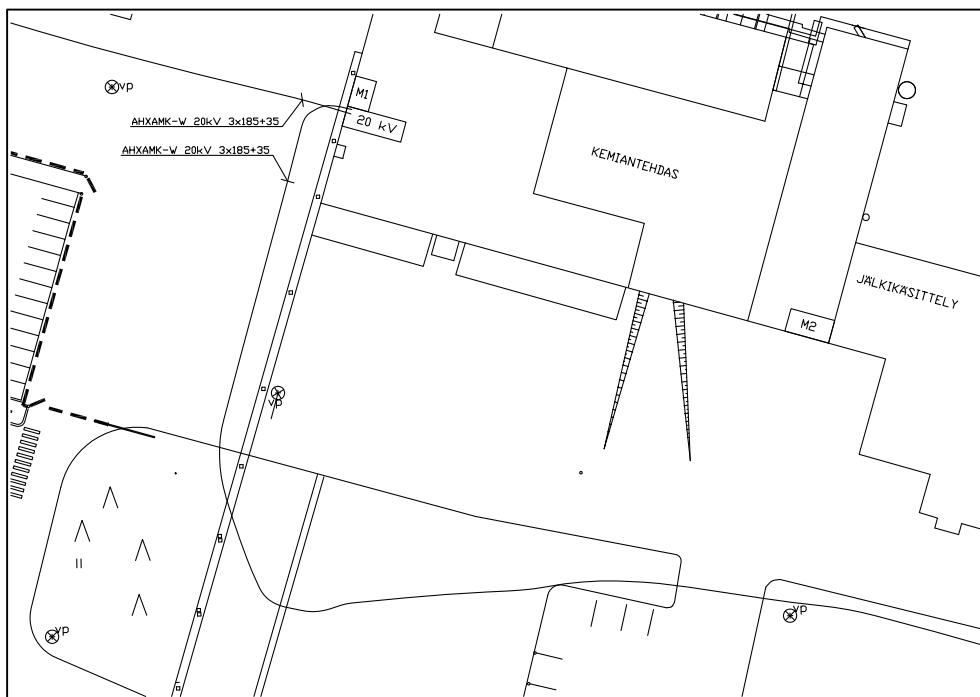
S_n = muuntajan nimelliskuormitus

P_{kn} = muuntajan nimelliset kuormitushäviöt

Mikäli tiedetään esimerkiksi vuoden ajalta keskimääräinen tehohäviö joka tunnille, voidaan nämä tehot integroida tietokoneohjelmistolla energiahäviöiksi. Kun energiahäviö ja energian hinta ovat tiedossa, voidaan laskea edelleen häviötehon aiheuttamat kustannukset. (21, s. 34–35.)

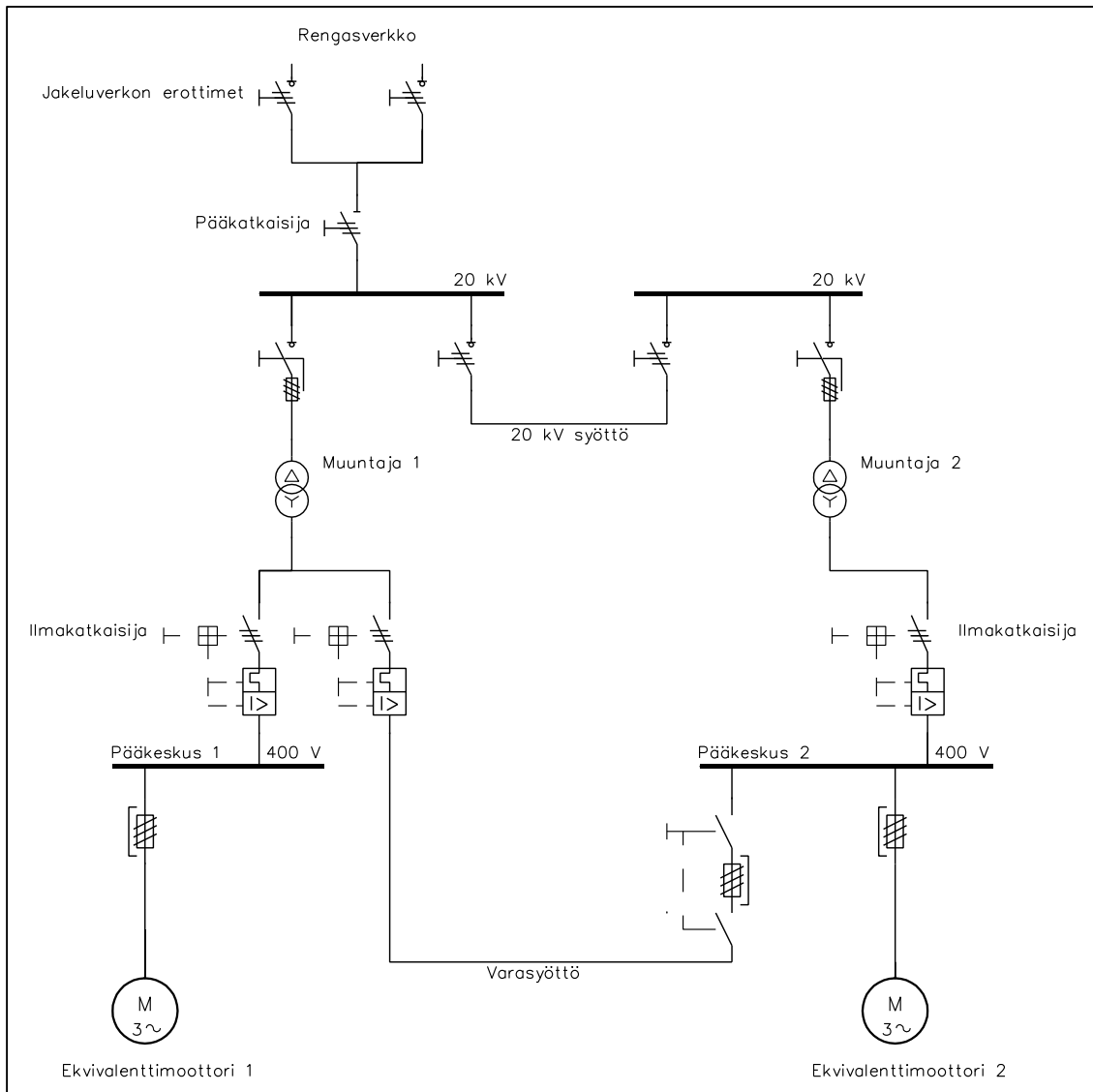
7 LÄÄKETEHTAAN NYKYTILAN SELVITTÄMINEN

Kuten kuvasta 8 käy ilmi, lääketehtas on liitettyä rengasverkkoon ja sitä on mahdollista syöttää kahdesta eri suunnasta, mikä lisää käyttövarmuutta ja lyhentää mahdollisista verkon häiriöistä aiheutuneita käyttökatkoksia. Lääketehtaan kaksi 1000 kVA:n kolmivaihemuuntajaa muuntavat jakeluverkon 20 kV:n keskijännitteen tehtaan 400 V:n pienjännitteeksi. Muuntajat ovat paisuntasäiliöisiä jakelumuuntajia, ja ne sijaitsevat kumpikin omassa sisämuuntamossaan eri puolilla lääketehdasta. Muuntamo 1 sijaitsee korjaamon vierisessä muuntamossa, kun taas muuntamo 2 sijaitsee sisävaraston vieressä. Suunnitteilla olevan laboratoriotilojen laajennuksen seurauksena muuntamo 2 jäisi sisävaraston ja laboratorion väliin. Kumpikin muuntaja syöttää omaa, muuntajasta parin metrin päässä sijaitsevaa pääkeskustaan. Näin 400 V:n johdotukset muuntajilta pääkeskuksille on saatu pidettyä mahdollisimman lyhyinä.



KUVA 8. Lääketehtas on osa rengasverkkoa. Muuntamot 1 (M1) ja 2 (M2) sijaitsevat eri puolilla tehdasta. Syöttöjohdot tulevat keskijännitetaltaan (20 kV).

Kuvassa 9 näkyy tehtaan sähköverkon yksinkertaistettu rakenne. Pääkeskuksiin 1 ja 2 on kytkettyä kuvitteelliset ekvivalenttimoottorit, joita hyödynnetään myöhemmin oikosulkuvirtalaskelmissa.



KUVA 9. Tehtaan sähkönsyötön rakenne

7.1 Syöttöverkko

Taulukossa 8 on koottuna Oulun Energialta saaduista sähköliittymän tuntisarjoista lasketut vuoden 2015 tuntikohtaisten tehojen ja tehokertoimien maksimit, minimi- ja keskiarvot. Taulukosta voidaan havaita, että lääketehtaan loistehon kompensointi toimii hyvin – näennäisteho on miltei kokonaan pätötehoa.

TAULUKKO 8. Sähkölaitteiden tuntikohtaisten tehojen ja tehokertoimien maksimit, minimi ja keskiarvot vuonna 2015

	Maksimi	Minimi	Keskiarvo
Näennäisteho	802,9 kVA	108,1 kVA	572,7 kVA
Pätöteho	799,2 kW	108,0 kW	572,4 kW
Loisteho	76,8 kvar	0,0 kvar	15,1 kvar
Tehokerroin, $\cos\varphi$	1,00	0,99	1,00

Kummankin pääkeskuksen yhteydessä on omat loistehon kompensointiparistot (kuva 10).



KUVA 10. Pääkeskuksen 1 kompensointiparistot

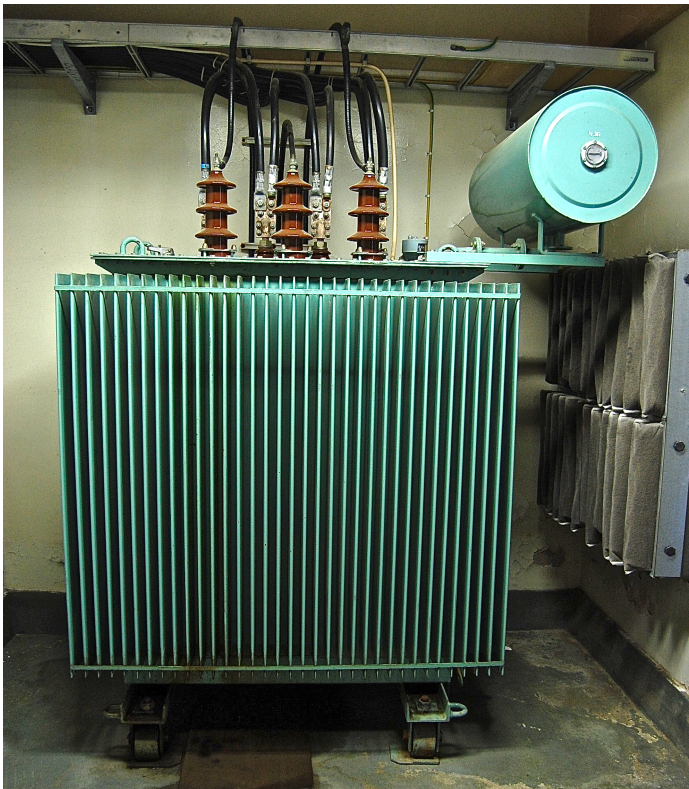
Oulun Energialta saatujen tietojen mukaan sähköaseman keskijännitekiskoston jännite pyritään pitämään 20,5 kV:ssa. Verkostolaskennan avulla laskettu jännitteenalenema sähköasemalta lääketehtaan muuntamoon on 1,8 %. Kaavan 32 avulla voidaan siis laskea muuntajan ensiön todellinen jännite (kaavassa $U_{2,sv}$).

$$U_{2,sv} = U_{1,sv} - U'_{h,sv} \cdot U_{1,sv}$$

$$U_{2,sv} = 20,5 \text{ kV} - 0,018 \cdot 20,5 \text{ kV} = 20,131 \text{ kV} \approx 20,1 \text{ kV}$$

7.2 Muuntajat

Muuntajista vanhempi, muuntaja 1 (kuva 11) on jo 43 vuotta vanha (vuosimallia 1973). Tätä hie-
man uudempi muuntaja 2 on 34 vuotta vanha (vuosimallia 1982). Molemmat muuntajat ovat pai-
suntasäiliöisiä jakelumuuntajia. Koska muuntajien maksimikäyttöikä voidaan yleisesti pitää 50
vuotta ja laskennallisena käyttöikä 30 vuotta, on muuntajien uusiminen jo pelkästään käyttöiän
perusteella ajankohtaista (23, s. 16).



KUVA 11. Muuntajista vanhempi, muuntaja 1, on jo 43 vuotta vanha paisuntasäiliöinen jakelu-
muuntaja.

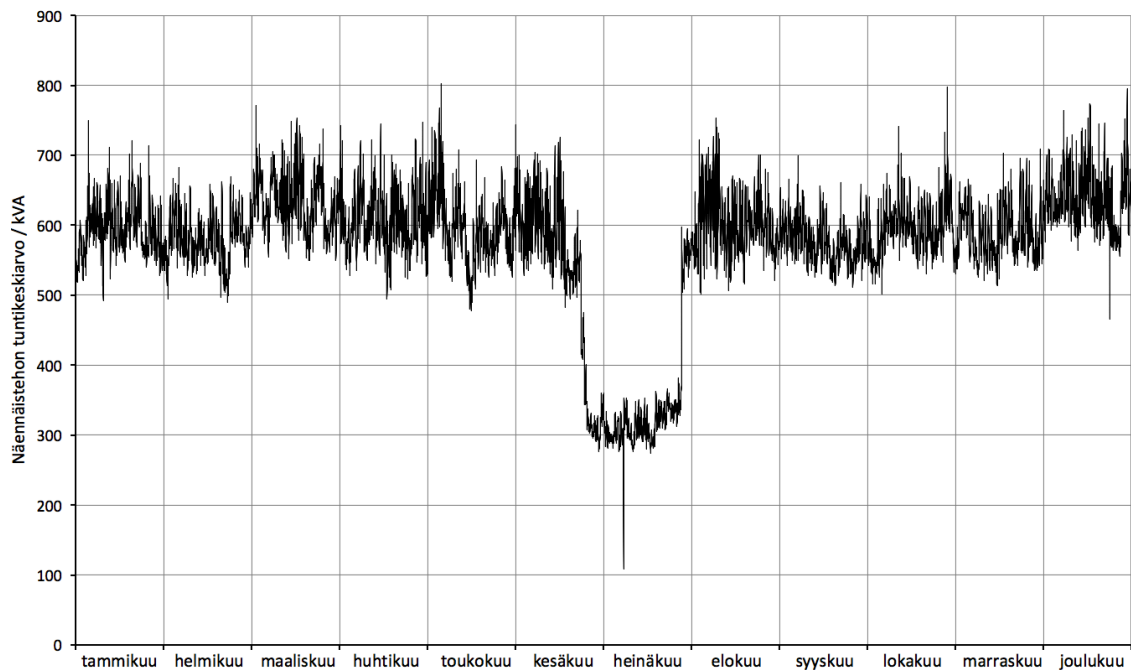
Kuten taulukosta 9 käy ilmi, muuntajat ovat keskenään hyvin samankaltaisia. Molemmat ovat
kytkentäryhmältään Dyn11. Muuntajien jänniteensäätö tapahtuu väliottokytkimillä niin, että ylä-
jännitettä voidaan säätää kaksi 2,5 %:n porrasta ylemmäs tai alemmas nimellisjännitteestä.

TAULUKKO 9. Nykyisten muuntajien kilpiarvot

	Muuntaja 1	Muuntaja 2
Valmistusvuosi	1973	1982
Nimellisteho, S_n	1000 kVA	1000 kVA
KytKentäryhmä	Dyn11	Dyn11
Ensiöjännite, U_{1N}	20000($\pm 2 \times 2,5\%$) V	20000($\pm 2 \times 2,5\%$) V
Ensiövirta, I_{1N}	28,9 A	28,9 A
Toisiojännite, U_{2N}	400 V	400 V
Toisiovirta, I_{2N}	1440 A	1444 A
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi, z_k	5,9 %	6,0 %
Tyhjäkäyntivirta, I_0	0,5 %	0,5 %
Nimelliset kuormitushäviöt, P_{kn}	9900 W	8200 W
Tyhjäkäyntihäviöt, P_0	1280 W	1440 W
Kokonaispaino	3600 kg	3200 kg
Öljyn paino	950 kg	870 kg

7.3 Sähkönkulutus

Lääketehtähdas toimii viisivuororjärjestelmässä siten, että sähkönkulutus on vuorokaudenajasta riippumatonta. Tämä näkyy myös liitteen 1 vuoden 2015 sähkönkulutuksen jakaumasta. Yösähkötuntia kohti kulutettu sähköenergia on keskimäärin ainoastaan 2,5 % pienempi kuin päivä-sähkötuntia kohti kulutettu sähköenergia. Kuten kuvasta 12 käy ilmi, sähkönkulutus on myös kuukausitasolla varsin tasaista. Ainoa suurempi näennäistehon muutos syntyy tehtaan kuukauden mittaisesta kesäseisokista.



KUVA 12. Lääketehtaan sähköliittymän vuoden 2015 näennäistehon tuntikeskiarvot

Sähkönkulutuksen jakautumista muuntajien välillä ei voida nykyisellään valvoa reaaliaikaisesti, mutta vuosina 2002–2011 muuntajien yksilöllisten energiamittareiden lukemat taulukoitiin kuukausittain. Taulukointi on liitteenä 2. Näistä sähkönkulutustiedoista on nähtävissä, että pääkeskuksen 1 kulutus on kuukausitasolla poikkeuksetta suurempi kuin pääkeskuksen 2 kulutus. Vuonna 2011 kulutus jakaantui pääkeskusten ja täten niitä syöttävien muuntajien välillä siten, että pääkeskus 1 kulutti 61 % sähköenergiasta ja pääkeskus 2 kulutti 39 % sähköenergiasta. Koska kulutussuhde on pysynyt vuodet 2002–2011 likimain samana eikä sähkönkulutuksessa ole tapahtunut merkittävää muutosta, voidaan kulutussuhteen olettaa olevan edelleen likimain 61:39.

Kuten taulukosta 10 käy ilmi, vuonna 2015 lääketehtaan sähköliittymän suurin näennäistehon tuntikeskiarvo oli noin 802,9 kVA (liite 3). Tällöin pätöteho oli noin 799,2 kW ja loisteho oli noin 76,8 kvar. Koska muuntajien kuormituksen oletetaan jakautuvan niin, että muuntajan 1 syöttämän pääkeskuksen 1 kuormitus on 61 % kokonaiskuormituksesta ja muuntajan 2 syöttämän pääkeskuksen 2 kuormitus on 39 % kokonaiskuormituksesta, huippukuormituksen aikana muuntajat kuormittuivat taulukon 10 mukaisesti.

TAULUKKO 10. Muuntajien lasketut tehot vuoden 2015 huippukuormituksen aikana

	Muuntaja 1	Muuntaja 2	Yhteensä
Osuus kokonaiskuormituksesta	61 %	39 %	100 %
Näennäisteho	489,8 kVA	313,1 kVA	802,9 kVA
Pätöteho	487,5 kW	311,7 kW	799,2 kW
Loisteho	46,8 kvar	30,0 kvar	76,8 kvar
cosφ	0,9954	0,9954	0,9954
φ	5,489°	5,489°	5,489°

Huippukuormituksen aikaiset pääkeskusten virrat $I_{PK1,max}$ ja $I_{PK2,max}$ saadaan laskettua näennäis-
tehon kaavalla.

$$I_{PK1,max} = \frac{489,8 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \approx 0,706904 \text{ kA} \approx 706,904 \text{ A}$$

$$I_{PK2,max} = \frac{313,1 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \approx 0,451955 \text{ kA} \approx 451,955 \text{ A}$$

7.4 Syöttöjohdot

Kumpikin muuntaja syöttää pääkeskustaan AMMK-tyypin suurvirtakaapeleilla. Kaapelien lukumäärä ja poikkipinta ovat molempien pääkeskusten syötoissä AMMK 3x4x300+2x300. Taulukosta 11 käy ilmi kaapelijärjestelmän sähköisiä arvoja (24, s. 4 ja 11).

TAULUKKO 11. AMMK 3x4x300+2x300 -suurvirtakaapelijärjestelmän ominaisuuksia

AMMK 3x4x300+2x300 – 3½-johdinjärjestelmä							
Asennuskuvio	L1	L2	L3	PEN	L3	L2	L1
	L1	L2	L3	PEN	L3	L2	L1
Eristyksen materiaali	PVC						
Vaipan materiaali	PVC						
Vaihejohtimen resistanssi (+70 °C)	30,3 mΩ/km						
Vaihejohtimen resistanssi (+20 °C)	25,3 mΩ/km						
Vaihejohtimen reaktanssi (50 Hz)	41 mΩ/km						
Kuormitettavuus (vaaka-as.)	1800 A						
Kuormitettavuus (pystyas.)	1600 A						

Pääkeskusta 1 syöttävät AMMK-kaapelit menevät muuntajan 1 muuntamosta sen viereiseen sähkötilaan, jossa sijaitsee pääkeskus 1. Kaapelit ovat tällä matkalla hyvin lyhyesti myös pystysuunnassa, ja niiden pituudet ovat noin 5 metriä. Pääkeskusta 2 syöttävät AMMK-kaapelit menevät muuntajasta 2 kerroksen ylemmäs, eli ne ovat osittain pystysuunnassa ja niiden pituudet ovat myös noin 5 metriä. Kuvasta 13 voi nähdä muuntajan 2 toisioliittimistä lähtevän AMMK-kaapelijärjestelmän.

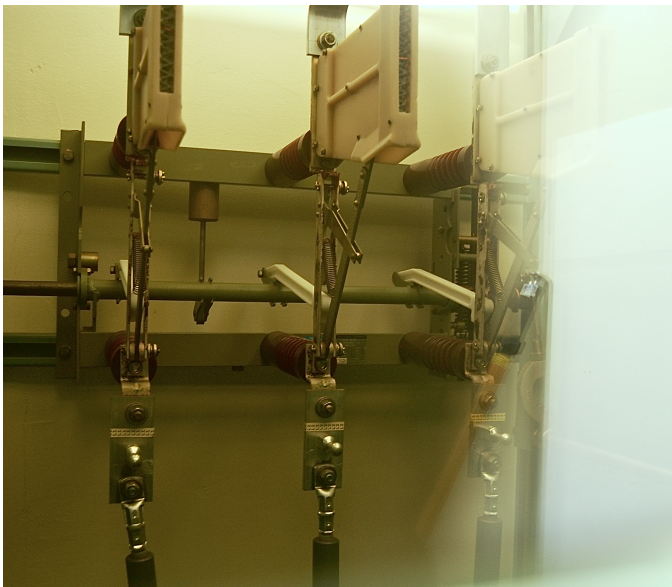


KUVA 13. Muuntajan 2 ensiö- ja toisioliitännät

Pääkeskusten välillä on toteutettu varasyöttö mahdollisten muuntajaongelmien varalta kahdella rinnankytketyllä AMCMK 3x185Al+51Cu -kaapelilla. Varasyötön kaapeleiden yhteenlaskettu kuormitettavuus on 570 A, mikä ei riitä kattamaan pääkeskuksen 1 aiemmin laskettua maksimivirtaa $I_{PK1,max}$ (25, s. 2). Niinpä varasyöttöjohto olisi uusittava tai mitoitus tarkistettava. Tässä työssä ei kuitenkaan paneuduta varasyötön mitoittamiseen.

7.5 Katkaisijat ja erottimet

Lääketehtaan keskijännitekojeistoon tulevien rengasverkkosyöttöjen jakeluverkonerottimeina toimii kaksi kuormanerotinta. Tämän jälkeen on keskijännitepuolella tehtaan pääkatkaisija. Pääkatkaisijan jälkeen kiskostosta lähtee 20 kV:n syötöt muuntajalle 1 sekä muuntamon 2 keskijännitekojeistolle. Muuntajan 1 syöttö lähtee varokekuormanerotimen takaa ja muuntamon 2 keskijännitekojeiston syöttö lähtee kuormanerotimen takaa (kuva 14). Muuntamon 2 päässä tämä 20 kV:n syöttöjohto kytkeytyy keskijännitekiskostoon kuormanerotimen välityksellä. Muuntamon 2 kiskostosta muuntajan 2 syöttöjohto lähtee varokekuormanerotimen takaa. Kaikkien edellä mainittujen katkaisijoiden ja erottimien kunto olisi hyvä tarkistaa muuntamouusinnan yhteydessä, ja ainakin pääkatkaisija olisi jo turvallisuussyistä hyvä vaihtaa sen vanhan iän vuoksi. Myös tehtaan keskijännitealiyhteyksien kuormanerotimet voisi olla ajankohtaista vaihtaa moottoriohjatuiksi.



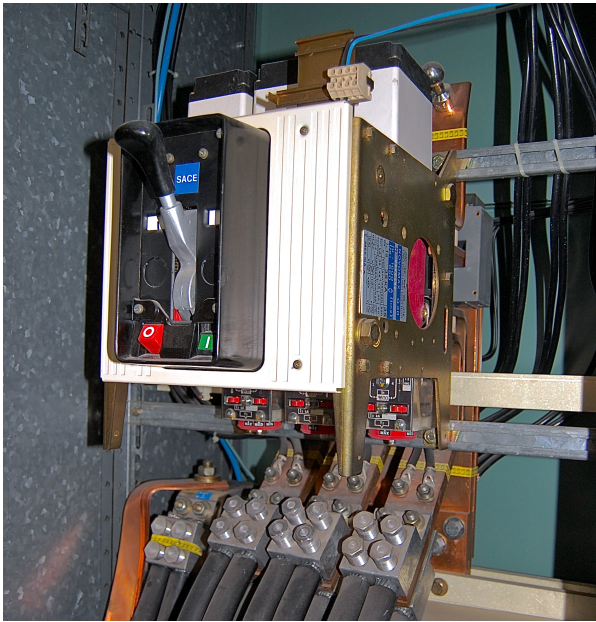
KUVA 14. Muuntamon 2 keskijännitesyötön kuormanerotin

Muuntajan 1 jälkeen pääkeskusta 1 suojaa 1600 A Unelec-ilmakatkaisija (kuva 15), joka tullaan uusimaan muuntamouusinnan yhteydessä.



KUVA 15. Pääkeskuksen 1 oikosulku- ja ylikuormitussuojana toimii Unelec-ilmakatkaisija. Syötöt tulevat muuntajasta katkaisijan alaosan kiskoihin.

Koska pääkeskus 2 on rakennettu pääkeskusta 1 myöhemmin, on sitä suojaava katkaisijakin hieman uudempi. Pääkeskusta 2 suojaa Novomax G30 -ilmakatkaisija (kuva 16). Myös sen uusiminen olisi ajankohtaista muuntamouusinnan yhteydessä.



KUVA 16. Pääkeskuksen 2 oikosulku- ja ylikuormitussuojana toimii Novomax G30 -ilmakatkaisija. Syötöt tulevat muuntajasta katkaisijan alaosan kiskoihin.

Pääkeskusten 1 ja 2 välinen varasyöttö on varustettu pääkeskuksen 1 päässä Unelec-ilmakatkaisijalla ja pääkeskuksen 2 päässä kytkinvarokkeella.

7.6 Kuormat

Lääketehtaalla on vain vähän suoraan verkkoon kytkettyjä moottoreita, jotka kasvattaisivat oikosulkuvirtaa. Ylivoimaisesti suurin osa tehtaan moottoreista on oikosulkumoottoreita. Uusimmat moottorit ovat poikkeuksetta taajuusmuuttajakäyttöisiä ja tulevaisuudennäkymissä on, että myös vanhempia moottoreita uudistettaisiin taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Moottoreista pääosa on pienitehoisia pumppuja. Suuritehoisimpia moottoreita ovat ilmastointikoneiden puhaltimien moottorit, kaksi paineilmakompressoria sekä kaksi kylmäkonekompressoria. Ilmastointikoneiden puhaltimien moottorit ovat molemmat taajuusmuuttajakäyttöisiä, samoin kuin uudemmat paineilma- ja kylmäkonekompressorit. Vanhemmat paineilma- (kuva 17) ja kylmäkonekompressorit (kuva 18) on kytketty verkkoon tähti-kolmiokäynnisteisinä ja niiden kilpiarvot on esitetty taulukoissa 12 ja 13.



KUVA 17. Lääketehtaan vanhempi, Atlas Copco -merkkinen paineilmakompressori



KUVA 18. Lääketehtaan vanhempi Schorch-kylmäkonekompressori

TAULUKKO 12. Vanhemman paineilmakompressorin moottorikilpiarvoja

Valmistaja	ATLAS COPCO / SIEMENS
Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellisjännite (kolmio)	415 V
Nimellisvirta (kolmio)	48 A

TAULUKKO 13. Vanhemman kylmäkonekompressorin moottorikilpiarvoja

Valmistaja	SCHORCH
Valmistusvuosi	1997
Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellinen akseliteho	90 kW
Nimellisjännite (kolmio)	400 V
Nimellisvirta (kolmio)	150 A
$\cos\varphi$	0,91
Nimellisaika	2970 rpm
Nimelliskäyttötapa	S1

Lisäksi tehtaalla on kuusi jatkuvakäyttöistä jäähdytysvesipumppua (kuva 19), joista viisi on kytketty suoraan verkkoon ja yksi on taajuusmuuttajakäyttöinen. Suoraan verkkoon kytketyistä moottoreista yksi on teholtaan 22 kW ja loput neljä 11 kW. Jäähdytysvesipumppujen moottoreiden kilpiarvoja on esitetty taulukoissa 14 ja 15.



KUVA 19. Osa jäähdytysvesipumpuista on kytketty suoraan verkkoon

TAULUKKO 14. 22 kW -moottorin kilpiarvoja

Valmistaja	ABB
Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellinen akseliteho	22 kW
Nimellisjännite (kolmio)	400 V
Nimellisvirta (kolmio)	38,5 A
$\cos\varphi$	0,89
Nimellisaika	2930 rpm

TAULUKKO 15. 11 kW -moottorin kilpiarvoja

Valmistaja	ABB
Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellinen akseliteho	11 kW
Nimellisjännite (kolmio)	400 V
Nimellisvirta (kolmio)	20 A
$\cos\varphi$	0,88
Nimellisaika	2930 rpm

Myös lääketehaan kuudessa vanhimmassa tuotantomoduulissa on suoraan verkkoon kytkettyjä moottoreita, joista merkittävimpiä ovat reaktoreiden sekoittimien moottorit. Kussakin kuudesta moduulista on neljä reaktoria, joista puolet voivat olla enimmillään yhtä aikaa käytössä. Tämän seurauksena verkkoon voi olla kytkettynä yhtä aikaa enintään 12 sekoitinmoottoria. Nämä moottorit ovat tehoiltaan erisuuruisia. Taulukoissa 16 ja 17 on esitetty kahden suuremman kokoluokan moottorin kilpiarvoja.

TAULUKKO 16. Flender-moottorin kilpiarvoja

Valmistaja	FLENDER
Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellinen akseliteho	11 kW
Nimellisjännite (kolmio)	400 V
Nimellisvirta (kolmio)	22,5 A
$\cos\varphi$	0,90
Nimellisaika	1440 rpm

TAULUKKO 17. Cemp-moottorin kilpiarvoja

Valmistaja	CEMP
Nimellistaajuus	50 Hz
Nimellinen akseliteho	7,49 kW
Nimellisjännite (kolmio)	400 V
Nimellisvirta (kolmio)	16,31 A
Nimellisaika	1448 rpm

Moottorikuormia on siis varsin vähän, ja ne ovat tehoiltaan pieniä, minkä seurauksena niiden aiheuttama oikosulkuvirta jäänee pieneksi verrattuna syöttöverkosta muuntajan läpi tulevaan oikosulkuvirtaan. Lääketehtaan muun kuormituksen voidaan olettaa tulevaisuudessa jopa pienentyvän, sillä esimerkiksi muuntajan 2 syöttämä VOC-laitos (kaasujenpolttolaitos) ollaan uudistamassa lähitulevaisuudessa pienempitehoiseksi. Myös moottoreiden syöttöjen uusimisen taajuusmuuttajakäyttöisiksi voidaan olettaa madaltavan niiden energiankulutusta. Valaistus- ja lämmityskuormien vaikutus oikosulkuvirran suuruuteen on pieni, eikä niitä sen vuoksi oteta huomioon oikosulkuvirtalaskelmissa (14, s. 21).

8 RATKAISUVAIHTOEHTO 1: MUUNTAJAT NYKYISILLE PAIKOILLEEN

Mikäli molemmat muuntajat uusittaisiin nykyisille paikoilleen, muuntaja 2 jäisi laboratoriolaajennuksessa rakennuksen keskelle. Jotta muuntamoon olisi mahdollista kulkea ulkokautta, tulisi sinne tehdä huoltokäytävä, joka lisäisi rakennuskustannuksia. On myös mahdollista, että 1000 kVA:n muuntajan aikaansaamat magneettikentät aiheuttaisivat häiriöitä laboratorion herkkiin mittalaitteisiin. Tähän voitaisiin varautua esimerkiksi muuttamalla muuntajan jälkeinen pienjännitekaapelointi kulkemaan lattiapinnassa tai sen alla. Myös pienjännitekaapeleiden koteloinnilla voidaan saada magneettikentät kuriin. (26, s. 32.)

8.1 Muuntajat

Lääketehtaan tuntikohtainen näennäistehon maksimi oli 802,9 kVA vuonna 2015. Tämän tehon voidaan kuvitella jakautuneen muuntajan 1 ja 2 välillä suhteessa 61:39. Uusien muuntajien mitoittamisessa on kuitenkin otettava huomioon sähkönsaannin varmistaminen erilaisissa ongelmatilanteissakin. Mikäli toista muuntajaa kohtaisi yllättävä käyttökatko, on muuntajamitoituksen mahdollistettava molempien pääkeskusten syöttäminen käytössä olevalla yhdellä toimivalla muuntajalla. Mitoitetaan siis muuntajat niin, että ne ovat kykeneviä syöttämään lääketehtaan koko sähkötehon.

Tällä hetkellä Oulun Energia vastaa muuntajien käytönjohtajuudesta, käytöstä ja kunnossapidosta, mikä on tehtaan kannalta helppo ja toimiva ratkaisu. Tämän vuoksi kyseistä järjestelyä tullaan käyttämään myös tulevaisuudessa. Oulun Energialla on hallussaan runsaasti 1000 kVA:n muuntajia ja niiden varaosia, minkä vuoksi 1000 kVA:n muuntajien huollettavuus ja toimintavarmuus on erittäin hyvä verrattuna muihin kokoluokkaa pienempiin muuntajiin. Tämän vuoksi on perusteltua ”ylimitoittaa” muuntajia hieman ja valita uusien muuntajien näennäistehoksi 1000 kVA. Tämä mahdollistaa myös tulevaisuuden mahdolliset laajennukset, vaikkakaan sähkötehon puolesta laajentamista ei ole näkyvissä lähitulevaisuudessa.

Koska muuntaja 2 jäisi laboratoriotilojen välittömään läheisyyteen, rakennuksen keskelle, olisi paloturvallisuuden vuoksi hyvä välttää öljymuuntajia. Valitaan siis muuntajiksi kaksi ABB:n 1000 kVA:n kuivamuuntajaa, joiden ominaisuuksia on koottu taulukkoon 18 (29).

TAULUKKO 18. ABB:n 1000 kVA:n kuivamuuntajan kilpiarvoja

Nimellisteho, S_n	1000 kVA
Kytkenäryhmä	Dyn11
Ensiöjännite, U_{1N}	20000 V
Toisiojännite, U_{2N}	400 V
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi, z_k	6 %
Nimelliset kuormitushäviöt, P_{kn}	9000 W
Tyhjäkäyntihäviöt, P_0	1550 W
Kokonaispaino	3140 kg
Käämimateriaali	Alumiini

8.2 Syöttöjohdot

Mikäli muuntajat uusittaisiin niiden nykyisille paikoilleen, ei nykyisiä syöttöjohtoja tarvitsisi välttämättä uusia. Pääkeskusten välisen varasyötön uusiminen olisi kuitenkin pakollista, sillä nykyisellään sen kuormitettavuus ei riittäisi syöttämään pääkeskusten vaatimia tehoja. 400 V varasyöttöjohdon vieminen tehtaan läpi vaatisi johdon poikkipinnalta paljon, mikä johtaisi suurehkoihin investointikustannuksiin. Tarkastellaan johtojen pääkeskusten syöttöjohtojen mitoitus niiden kuormitettavuuden mukaan. Muuntajan todellinen kuormitettavuus on laskettavissa sen nimellisenännäistehosta kaavalla 2. Kuormitettavuuskerroin saadaan taulukosta 2.

$$S_{tod} = 1,0 \cdot 1000 \text{ kVA} = 1000 \text{ kVA}$$

Kuormitusvirta I_B on tällöin laskettavissa näennäistehon kaavalla.

$$I_B = \frac{1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \approx 1,4434 \text{ kA}$$

Nykyisen AMMK 3x4x300+2x300 -kaapelijärjestelmän kuormitettavuus on kaapelijärjestelmän heikoimmassa kohdassa, pystyasennuksessa 1,6 kA. Tämä tarkoittaa, että nykyisen kaapelijärjestelmän kuormitettavuus on niin suuri, että pääkeskuksia voitaisiin syöttää muuntajien nimellistehoilla. Näin suuri kuormitus olisi kuitenkin tehtaan nykyisen kuormitustilanteen huomioon ottaen

8.4 Impedanssien määrittäminen

Ennen oikosulkuvirtojen laskemista on selvitettävä sähköverkon komponenttien impedanssit.

8.4.1 Syöttävä verkko

Oulun Energialta saatujen tietojen mukaan lääketehaan sähköliittymän keskijännitepuolen kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta $I'_{k3,v}$ on 2,42 kA ja yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta $I'_{k1,v}$ on 1,85 kA. Lasketaan kolmivaiheisen alkuoikosulkuvirran avulla syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi kaavalla 12. Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään taulukon 3 keskijänniterivin c_{max} -arvoa.

$$Z_{k,vmax} = \frac{1,10 \cdot 20000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2420 \text{ A}} \approx 5,2486 \Omega$$

Lasketusta oikosulkuimpedanssista $Z_{k,v}$ voidaan ratkaista syöttävän verkon oikosulkureaktanssi kaavalla 14 ja edelleen syöttävän verkon oikosulkuresistanssi kaavalla 15.

$$X_{k,vmax} = 0,995 \cdot 5,2486 \Omega \approx 5,2224 \Omega$$

$$R_{k,vmax} = 0,1 \cdot 5,2224 \Omega \approx 0,5222 \Omega$$

Oikosulkuimpedanssi voidaan esittää vektorimuodossa.

$$\bar{Z}_{k,vmax} = (0,5222 + j5,2224) \Omega$$

Impedanssi, reaktanssi ja resistanssi redusoidaan 400 V jännitetasoon kaavalla 27.

$$Z'_{k,vmax} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 \cdot 5,2486 \Omega \approx 2,0995 \text{ m}\Omega$$

$$X'_{k,vmax} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 \cdot 5,2224 \Omega \approx 2,0890 \text{ m}\Omega$$

$$R'_{k,vmax} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 \cdot 0,5222 \Omega \approx 0,2089 \text{ m}\Omega$$

Redusoitu oikosulkuimpedanssi voidaan esittää edelleen vektorimuodossa.

$$\bar{Z}'_{k,vmax} = (0,2089 + j2,0890) \text{ m}\Omega$$

Pienimmän oikosulkuvirran laskentaa varten syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla 12 käyttäen taulukon 3 keskijänniterivin c_{min} -arvoa.

$$Z_{k,vmin} = \frac{1,00 \cdot 20000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2420 \text{ A}} \approx 4,7715 \Omega$$

Oikosulkuimpedanssin avulla lasketaan oikosulkureaktanssi ja -resistanssi kuten edellä.

$$X_{k,vmin} = 0,995 \cdot 4,7715 \Omega \approx 4,7476 \Omega$$

$$R_{k,vmin} = 0,1 \cdot 4,7476 \Omega \approx 0,4748 \Omega$$

Oikosulkuimpedanssi voidaan esittää vektorimuodossa.

$$\bar{Z}_{k,vmin} = (0,4748 + j4,7476) \Omega$$

Impedanssi, reaktanssi ja resistanssi redusoidaan 400 V jännitetasoon kaavalla 27.

$$Z'_{k,vmin} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 \cdot 4,7715 \Omega \approx 1,9086 \text{ m}\Omega$$

$$X'_{k,vmin} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 \cdot 4,7476 \Omega \approx 1,8991 \text{ m}\Omega$$

$$R'_{k,vmin} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \right)^2 \cdot 0,4748 \Omega \approx 0,1899 \text{ m}\Omega$$

Siispä redusoitu oikosulkuimpedanssi voidaan esittää edelleen vektorimuodossa.

$$\bar{Z}'_{k,vmin} = (0,1899 + j1,8991) \text{ m}\Omega$$

8.4.2 Muuntajat

1000 kVA:n kuivamuuntajan impedanssi lasketaan 400 V:n jännitetasolle kaavalla 17. Suhteellinen oikosulkuimpedanssi saadaan taulukosta 18. Koska muuntajat 1 ja 2 ovat identtiset, on niillä sama oikosulkuimpedanssi, -reaktanssi ja -resistanssi. Merkitään kuivamuuntajan oikosulkuimpedanssia $Z_{k,mk}$:na.

$$Z_{k,mk} = \frac{0,06 \cdot (400 \text{ V})^2}{1000000 \text{ VA}} = 9,6 \text{ m}\Omega$$

Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi lasketaan kaavalla 18. Nimelliset kuormitushäviöt saadaan taulukosta 18.

$$r_{k,mk} = \frac{9000 \text{ W}}{1000000 \text{ VA}} = 0,009 = 0,9 \%$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi lasketaan 400 V:n jännitetasolle kaavalla 19.

$$R_{k,mk} = \frac{0,009 \cdot (400 \text{ V})^2}{1000000 \text{ VA}} = 1,44 \text{ m}\Omega$$

Muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi lasketaan suhteellisen oikosulkuimpedanssin ja -resistanssin avulla kaavalla 20.

$$x_{k,mk} = \sqrt{0,06^2 - 0,009^2} \approx 0,059321 = 5,9321 \%$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi lasketaan 400 V:n jännitetasolle kaavalla 21.

$$X_{k,mk} = \frac{0,059321 \cdot (400 \text{ V})^2}{1000000 \text{ VA}} \approx 9,4914 \text{ m}\Omega$$

Muuntajan oikosulkuimpedanssi voidaan esittää vektorimuodossa.

$$\bar{Z}_{k,mk} = (1,44 + j9,4914) \text{ m}\Omega$$

Koska kaavan 6 ehto toteutuu, lääketehtaan pienjänniteverkon oikosulkupiirin vastaimpedanssin voidaan olettaa olevan myötäimpedanssin suuruinen.

$$9,4914 \text{ m}\Omega \geq 2 \cdot 0,8776 \text{ m}\Omega$$

$$9,4914 \text{ m}\Omega \geq 1,7551 \text{ m}\Omega$$

Muuntajan nolaresistanssi ja -reaktanssi saadaan taulukosta 5.

$$R_{m0,k} = 1,8 \text{ m}\Omega$$

$$X_{m0,k} = 8,3 \text{ m}\Omega$$

Nolaresistanssin ja -reaktanssin avulla saadaan edelleen laskettua nollaimpedanssi Pythagoraan lauseella.

$$Z_{m0,k} = \sqrt{(1,8 \text{ m}\Omega)^2 + (8,3 \text{ m}\Omega)^2} \approx 8,4929 \text{ m}\Omega$$

Muuntajan nollaimpedanssi voidaan esittää vektorimuodossa.

$$\bar{Z}_{m0,k} = (1,8 + j8,3) \text{ m}\Omega$$

8.4.3 Syöttöjohdot

Nykyisen AMMK 3x4x300+2x300 -kaapelijärjestelmän impedanssi on laskettavissa kaavalla 22. Pääkeskusta 1 syöttävän syöttöjohdon 1 impedanssi Z_{sj1} lasketaan taulukon 11 arvoja hyödyntämällä. Resistanssiarvona käytetään resistanssia +20 °C -lämpötilassa ja pituutena aiemmin arviointua 5 m.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{sj1} &= \left(25,3 \text{ m}\Omega/\text{km} + j(41 \text{ m}\Omega/\text{km}) \right) \cdot 0,005 \text{ km} \\ &= (0,1265 + j0,205) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

Koska syöttöjohtojen 1 ja 2 pituudet ovat samat, on niillä myös sama impedanssi.

$$\bar{Z}_{sj2} = (0,1265 + j0,205) \text{ m}\Omega$$

8.4.4 Ekvivalenttimoottorit

Lääketehtaan aiemmin eritellyistä tehoiltaan suurimmista oikosulku- eli epätahtimoottoreista kaikki muut ovat muuntajan 1 takana eli kytkettynä pääkeskukseen 1, paitsi moduulin 6 sekoittajien moottorit. Niiden syötöt tulevat muuntajan 2 kautta, eli ne ovat kytkettynä pääkeskukseen 2. Muodostetaan moottoreista muuntajakohtaiset ekvivalenttimoottorit, jotta oikosulkuimpedanssit on helpompi määrittää. Laskuissa hyödynnetään oikosulkumoottoreiden kilpiarvoja, jotka löytyvät taulukoista 12, 13, 14, 15, 16 ja 17.

Muuntajan 1 syöttämien oikosulkumoottoreiden nimellinäennäistehot lasketaan kolmivaiheisen näennäistehon kaavalla.

Vanhan paineilmakompressorin nimellinäennäisteho:

$$S_{n,em1} = \sqrt{3} \cdot 415 \text{ V} \cdot 48 \text{ A} \approx 34,5025 \text{ kVA}$$

Vanhan kylmäkonekompressorin nimellinäennäisteho:

$$S_{n,em2} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 150 \text{ A} \approx 103,9230 \text{ kVA}$$

22 kW jäähdytysvesipumpun moottorin nimellinäennäisteho:

$$S_{n,em3} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 38,5 \text{ A} \approx 26,6736 \text{ kVA}$$

11 kW jäähdytysvesipumpun moottorin nimellinäennäisteho:

$$S_{n,em4} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 20 \text{ A} \approx 13,8564 \text{ kVA}$$

Reaktorin sekoittajan Flender-merkkisen moottorin nimellinäennäisteho:

$$S_{n,em5} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 22,5 \text{ A} \approx 15,5885 \text{ kVA}$$

Reaktorin sekoittajan Cemp-merkkisen moottorin nimellinäennäisteho:

$$S_{n,em6} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 16,31 \text{ A} \approx 11,2999 \text{ kVA}$$

Tilanteessa, jossa moottorit aiheuttavat suurimman oikosulkuvirran pääkeskuksen 1 kiskostoon, molemmat kompressorit, kaikki viisi jäähdytysvesipumppua sekä tuotantomoduulien 1–5 yhteensä kymmenen suuritehoisinta reaktorin sekoittajaa käyvät. Vaikka reaktorien sekoittajien moottorit ovat todellisuudessa tehoiltansa eriäviä, käytetään yhden moottorin nimellinäennäistehona tehokkaimman Flender-moottorin nimellinäennäistehoa $S_{n,em5}$. Tällöin laskusta tulee yksinkertaisempi, mutta toisaalta oikosulkuimpedanssista muodostuu hieman todellista oikosulkuimpedanssia pienempi, mikä taas osaltaan kasvattaa oikosulkuvirtaa.

Muuntajan 1 syöttämien moottoreiden muodostaman ekvivalenttimoottorin nimellinäennäisteho $S_{n,E1}$ lasketaan summaamalla osatehot keskenään.

$$S_{n,E1} = 34,5025 \text{ kVA} + 103,9230 \text{ kVA} + 26,6736 \text{ kVA} + 4 \\ \cdot 13,8564 \text{ kVA} + 10 \cdot 15,5885 \text{ kVA} \approx 376,4093 \text{ kVA}$$

Ekvivalenttimoottorin oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla 24. Käynnistysvirran arvioidaan olevan kuusinkertainen nimellisvirtaan verrattuna.

$$Z_{E1} = \frac{(400 \text{ V})^2}{6 \cdot 376409,3 \text{ VA}} \approx 70,8449 \text{ m}\Omega$$

Oikosulkuimpedanssi jaetaan oikosulkureaktanssiksi ja -resistanssiksi taulukon 7 mukaisesti.

$$X_{E1} = 0,922 \cdot 70,8449 \text{ m}\Omega \approx 65,3190 \text{ m}\Omega$$

$$R_{E1} = 0,42 \cdot 65,3190 \text{ m}\Omega \approx 27,4340 \text{ m}\Omega$$

Ekvivalenttimoottorin oikosulkuimpedanssi voidaan esittää vektorimuodossa.

$$\bar{Z}_{E1} = (27,4340 + j65,3190) \text{ m}\Omega$$

Määritetään seuraavaksi vastaavasti muuntajan 2 moottorikuormalle ekvivalenttimoottori. Muuntaja 2 syöttää pääkeskusta 2, johon on kytketty aiemmin määritellyistä tehoiltaan suurimmista epätahtimoottoreista ainoastaan moduulin 6 sekoittajien moottorit. Tilanteessa, jossa kyseiset moottorit aiheuttavat suurimman oikosulkuvirran pääkeskuksen 2 kiskostoon, on moduulin 6 sekoittajien moottoreista kaksi suuritehoisinta käynnissä. Käytetään tässäkin tapauksessa yhden moottorin nimellinäennäistehona tehokkaimman Flender-moottorin nimellinäennäisteho $S_{n,em5}$. Tällöin laskusta tulee yksinkertaisempi, mutta toisaalta oikosulkuimpedanssista muodostuu hieman todellista oikosulkuimpedanssia pienempi, mikä taas osaltaan kasvattaa oikosulkuvirtaa.

Muuntajan 2 syöttämien moottoreiden muodostaman ekvivalenttimoottorin nimellinäennäisteho $S_{n,E2}$ lasketaan summaamalla kahden sekoittajan moottorin osatehot keskenään.

$$S_{n,E2} = 2 \cdot 15,5885 \text{ kVA} \approx 31,1769 \text{ kVA}$$

Ekvivalenttimoottorin oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla 24. Käynnistysvirran arvioidaan olevan kuusinkertainen nimellisvirtaan verrattuna.

$$Z_{E2} = \frac{(400 \text{ V})^2}{6 \cdot 31176,9 \text{ VA}} \approx 855,3337 \text{ m}\Omega$$

Oikosulkuimpedanssi jaetaan oikosulkureaktanssiksi ja -resistanssiksi taulukon 7 mukaisesti.

$$X_{E2} = 0,922 \cdot 855,3337 \text{ m}\Omega \approx 788,6177 \text{ m}\Omega$$

$$R_{E2} = 0,42 \cdot 788,6177 \text{ m}\Omega \approx 331,2194 \text{ m}\Omega$$

Ekvivalenttimoottorin oikosulkuimpedanssi voidaan esittää vektorimuodossa.

$$\bar{Z}_{E2} = (331,2194 + j788,6177) \text{ m}\Omega$$

8.4.5 Ekvivalenttijohdot

Määritetään aiemmin muodostetuille ekvivalenttimoottoreille ekvivalenttijohdot. Ekvivalenttimoottorit 1 ja 2 muodostuvat yhteensä 19 verkkoon kytketystä moottorista. Lasketaan moottoreiden keskimääräinen nimellinäennäisteho.

$$S_{n,Eka} = \frac{407,5862 \text{ kVA}}{19} \approx 21,4519 \text{ kVA}$$

Näennäistehon kaavalla voidaan selvittää, kuinka suuren kuormitusvirran yksi keskimääräinen moottori ottaa nimellisteholla.

$$I_{n,Eka} = \frac{21,4519 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \approx 30,9632 \text{ A}$$

Kuvitteellista syöttöjohtoa voisi siis suojata nimellisvirroiltaan 32 A:n sulakkeet, jotka vaativat johdolta kuormitettavuutta vähintään 35 A (30, s. 134). Asennustapojen korjauskertoimen C voidaan arvioida olevan vierekkäisten kaapelien virtapiirien vuoksi 0,80 (30, s. 224). Näin ollen johdolta vaadittava kuormitettavuus saadaan laskettua jakamalla johdon normaali kuormitettavuus korjauskertoimella.

$$I_{tj,Eka} = \frac{35 \text{ A}}{0,80} = 43,75 \text{ A}$$

Asennustavan ollessa E (monijohdinkaapeli kaapelitikkailla) 6 mm² -poikkipintaista kuparijohdinta voidaan kuormittaa 45 A:lla (30, s. 217). Kuvitteelliseksi syöttöjohdoiksi valitaan siis MMJ 4x6 -kaapelit.

Yhden kuvitteellisen syöttöjohdon impedanssi lasketaan liitteen 4 kaapelitietoja hyväksikäyttäen kaavalla 22. Keskimääräisen kaapelipituuden arvioidaan olevan 40 metriä.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{j,Eka} &= \left(3,322 \text{ } \Omega / km + j(0,115 \text{ } \Omega / km) \right) \cdot 0,040 \text{ km} \\ &= (132,88 + j4,6) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

Lasketaan seuraavaksi ekvivalenttimootorin 1 ekvivalenttijohdon impedanssi. Ekvivalenttimootorin 1 voidaan kuvitella syöttävän pääkeskukseen 1 oikosulkuvirtaa 17 rinnankytkettyä MMJ 4x6 -kaapelia pitkin. Ekvivalenttijohdon 1 impedanssi saadaan laskettua rinnankytkettyjen impedanssien laskukaavalla.

$$\begin{aligned}\frac{1}{\bar{Z}_{j,E1}} &= 17 \cdot \left(\frac{1}{\bar{Z}_{j,Eka}} \right) \\ \frac{1}{\bar{Z}_{j,E1}} &= \frac{17}{(132,88 + j4,6) \text{ m}\Omega} \\ \bar{Z}_{j,E1} &= \frac{(132,88 + j4,6) \text{ m}\Omega}{17} \approx (7,8165 + j0,2706) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

Ekvivalenttimootorin 2 voidaan taas kuvitella syöttävän pääkeskukseen 2 oikosulkuvirtaa 2 rinnankytkettyä MMJ 4x6 -kaapelia pitkin. Lasketaan ekvivalenttijohdon 2 impedanssi.

$$\begin{aligned}\frac{1}{\bar{Z}_{j,E2}} &= \frac{2}{(132,88 + j4,6) \text{ m}\Omega} \\ \bar{Z}_{j,E2} &= \frac{(132,88 + j4,6) \text{ m}\Omega}{2} = (66,44 + j2,3) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

8.5 Oikosulkuvirrat 400 V pääkeskusten kiskostoissa

8.5.1 Pääkeskuksen 1 suurimmat alkuoikosulkuvirrat

Lasketaan pääkeskusten 1 ja 2 kiskostojen suurimmat alkuoikosulkuvirrat. Pääkeskuksen 1 oikosulkuvirta koostuu syöttöverkosta muuntajan 1 ja syöttöjohdon 1 läpi tulevasta oikosulkuvirrasta sekä ekvivalenttimoottorista 1 ekvivalenttijohdon 1 läpi tulevasta oikosulkuvirrasta.

Syöttöverkosta oikosulkuun tuleva suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan kaavan 3 avulla. Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään c_{\max} -arvoa, joka saadaan taulukosta 3 sekä $Z'_{k,v\max}$ -arvoa. Koska syöttöverkko, muuntaja 1 ja syöttöjohto 1 ovat oikosulkuvirtapiirissä sarjassa, voidaan niiden myötäimpedanssit summata yhteen.

$$\begin{aligned}\bar{I}''_{k3,v1\max} &= \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}'_{k,v\max} + \bar{Z}_{k,mk} + \bar{Z}_{sj1})} \\ &= \frac{1,00 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot [(0,2089 + j2,0890) \text{ m}\Omega + (1,44 + j9,4914) \text{ m}\Omega + (0,1265 + j0,205) \text{ m}\Omega]} \\ &\approx (2886,5 - j19160) \text{ A} \approx 19,377 \angle -81,433^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

Ekvivalenttimoottorista 1 ekvivalenttijohdon 1 läpi pääkeskuksen 1 kiskostoon tuleva suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan kaavalla 3. Koska ekvivalenttimoottori 1 ja ekvivalenttijohdo 1 ovat oikosulkuvirtapiirissä sarjassa, voidaan niiden myötäimpedanssit summata yhteen.

$$\begin{aligned}\bar{I}''_{k3,E1\max} &= \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{E1} + \bar{Z}_{j,E1})} \\ &= \frac{1,00 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot [(27,4340 + j65,3190) \text{ m}\Omega + (7,8165 + j0,2706) \text{ m}\Omega]} \\ &\approx (1468,2 - j2731,9) \text{ A} \approx 3,1015 \angle -61,745^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

Pääkeskuksen 1 kiskoston suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta $\bar{I}''_{k3,PK1\max}$ saadaan summaamalla osavirrat $\bar{I}''_{k3,v1\max}$ ja $\bar{I}''_{k3,E1\max}$ keskenään.

$$\begin{aligned}
\bar{I}''_{k3,PK1max} &= \bar{I}''_{k3,v1max} + \bar{I}''_{k3,E1max} \\
&= (2886,5 - j19160) A + (1468,2 - j2731,9) A \\
&\approx (4354,7 - j21893) A \approx 22,322 \angle -78,750^\circ kA
\end{aligned}$$

Pääkeskuksen 1 suurin kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan suurimman kolmivaiheisen alkuoikosulkuvirran avulla kaavalla 7.

$$\begin{aligned}
\bar{I}''_{k2,PK1max} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (4354,7 - j21893) A \\
&\approx (3771,3 - j18960) A \approx 19,331 \angle -78,750^\circ kA
\end{aligned}$$

Lasketaan pääkeskuksen 1 suurin yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta. Ekvivalenttimoottorin 1 synnyttämä oikosulkuvirta sekä syöttöjohdon 1 nollaimpedanssi jätetään huomioimatta. Kolmivaiheisen oikosulkuvirtana voidaan tällöin käyttää pelkkää syöttöverkosta oikosulkuun tulevaa suurinta kolmivaiheista alkuoikosulkuvirtaa. Suurin yksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 8. Koska syöttöjohdon nollaimpedanssin tarkka laskeminen on vaikeaa, käytetään kaavan 8 Z_0/Z_1 -suhteena muuntajan nolla- ja vastaimpedanssien suhdetta. Saatava suurin yksivaiheinen oikosulkuvirta on täten ainoastaan arvio.

$$\begin{aligned}
\bar{I}''_{k1,PK1max} &= \frac{3}{2 + \frac{(1,8 + j8,3) m\Omega}{(1,44 + j9,4914) m\Omega}} \cdot (2886,5 - j19160) A \\
&\approx (3387,6 - j19873) A \approx 20,160 \angle -80,326^\circ kA
\end{aligned}$$

Pääkeskuksen 1 suurin alkuoikosulkuvirta saadaan siis kolmivaiheisessa oikosulussa.

8.5.2 Pääkeskuksen 2 suurimmat alkuoikosulkuvirrat

Koska muuntajia 1 ja 2 syöttää sama verkko ja muuntajat 1 ja 2 sekä syöttöjohdot 1 ja 2 ovat identtisiä, on syöttöverkosta pääkeskuksen 2 oikosulkuun tuleva suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta sama, kuin aiemmin laskettu pääkeskuksen 1 vastaava virta.

$$\bar{I}''_{k3,v2max} \approx (2886,5 - j19160) A \approx 19,377 \angle -81,433^\circ kA$$

Ekvivalenttimoottorista 2 ekvivalenttijohdon 2 läpi pääkeskuksen 2 kiskostoon tuleva suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan kaavalla 3. Koska ekvivalenttimoottori 2 ja ekvivalenttijohdot 2 ovat oikosulkuvirtapiirissä sarjassa, voidaan niiden myötäimpedanssit summata yhteen.

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{k3,E2max} &= \frac{c_{max} U_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{E2} + \bar{Z}_{j,E2})} \\ &= \frac{1,00 \cdot 400 V}{\sqrt{3} \cdot [(331,2194 + j788,6177) m\Omega + (66,44 + j2,3) m\Omega]} \\ &\approx (117,18 - j223,07) A \approx 260,873 \angle -63,308^\circ A \end{aligned}$$

Pääkeskuksen 2 kiskoston suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta $\bar{I}''_{k3,PK2max}$ saadaan summamalla osavirrat $\bar{I}''_{k3,v2max}$ ja $\bar{I}''_{k3,E2max}$ keskenään.

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{k3,PK2max} &= \bar{I}''_{k3,v2max} + \bar{I}''_{k3,E2max} \\ &= (2886,5 - j19160) A + (117,18 - j223,07) A \\ &\approx (3003,6 - j19394) A \approx 19,625 \angle -81,196^\circ kA \end{aligned}$$

Pääkeskuksen 2 suurin kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan suurimman kolmivaiheisen alkuoikosulkuvirran avulla, kaavalla 7.

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{k2,PK2max} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (3003,6 - j19394) A \\ &\approx (2601,2 - j16796) A \approx 16,996 \angle -81,196^\circ kA \end{aligned}$$

Pääkeskuksen 2 suurin yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan samalla tavalla kuin pääkeskuksen 1 tapauksessa. Koska huomioidaan vain syöttöverkosta oikosulkuun tuleva suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta ja muuntajat 1 ja 2 ovat identtiset, suurin yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta on sama pääkeskuksissa 1 ja 2.

$$\bar{I}''_{k1,PK2max} \approx (3387,6 - j19873) A \approx 20,160 \angle -80,326^\circ kA$$

Pääkeskuksen 2 suurin alkuoikosulkuvirta saadaan siis yksivaiheisessa oikosulussa.

8.5.3 Pääkeskuksen 1 sysäysoikosulkuvirta

Pääkeskukselle 1 syöttöverkosta tulevan oikosulkuvirran virtapiirin kokonaisimpedanssi lasketaan summaamalla syöttöverkon, muuntajan 1 ja syöttöjohdon 1 myötäimpedanssit keskenään.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{k,v1max} &= (0,2089 + j2,0890) \text{ m}\Omega + (1,44 + j9,4914) \text{ m}\Omega \\ &\quad + (0,1265 + j0,205) \text{ m}\Omega \\ &\approx (1,7754 + j11,785) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

Jaetaan kokonaisimpedanssi resistanssiin ja reaktanssiin, ja lasketaan niiden avulla sysäyskerroin kaavalla 10.

$$R_{k,v1max} \approx 1,7754 \text{ m}\Omega$$

$$X_{k,v1max} \approx 11,785 \text{ m}\Omega$$

$$\kappa_{v1} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3 \cdot 1,7754 \text{ m}\Omega}{11,785 \text{ m}\Omega}} \approx 1,6437$$

Syöttöverkosta pääkeskuksen 1 oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta lasketaan kaavalla 9.

$$\bar{I}_{s,v1} = 1,6437 \cdot \sqrt{2} \cdot (19,377 \angle -81,433^\circ \text{ kA}) \approx 45,042 \angle -81,433^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskukselle 1 ekvivalenttimoottorista 1 tulevan oikosulkuvirran virtapiirin kokonaisimpedanssi lasketaan summaamalla ekvivalenttimoottorin 1 ja ekvivalenttijohdon 1 myötäimpedanssit keskenään.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{E1,kok} &= (27,4340 + j65,3190) \text{ m}\Omega + (7,8165 + j0,2706) \text{ m}\Omega \\ &\approx (35,250 + j65,590) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

Jaetaan kokonaisimpedanssi resistanssiin ja reaktanssiin, ja lasketaan niiden avulla sysäyskerroin kaavalla 10.

$$R_{k,E1kok} \approx 35,250 \text{ m}\Omega$$

$$X_{k,E1kok} \approx 65,590 \text{ m}\Omega$$

$$\kappa_{E1} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3 \cdot 35,250 \text{ m}\Omega}{65,590 \text{ m}\Omega}} \approx 1,2154$$

Ekvivalenttimoottorista 1 pääkeskuksen 1 oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta lasketaan kaavalla 9.

$$\bar{i}_{s,E1} = 1,2154 \cdot \sqrt{2} \cdot (3,1015 \angle -61,745^\circ \text{ kA}) \approx 5,3310 \angle -61,745^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskuksen 1 kiskoston sysäysoikosulkuvirta $i_{s,PK1}$ saadaan summaamalla osavirrat $i_{s,v1}$ ja $i_{s,E1}$ keskenään.

$$\begin{aligned} \bar{i}_{s,PK1} &= \bar{i}_{s,v1} + \bar{i}_{s,E1} \\ &= (45,042 \angle -81,433^\circ \text{ kA}) + (5,3310 \angle -61,745^\circ \text{ kA}) \\ &\approx 50,093 \angle -79,378^\circ \text{ kA} \end{aligned}$$

8.5.4 Pääkeskuksen 2 sysäysoikosulkuvirta

Koska muuntajia 1 ja 2 syöttää sama verkko ja muuntajat 1 ja 2 sekä syöttöjohdot 1 ja 2 ovat identtisiä, on syöttöverkosta pääkeskuksen 2 oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta sama kuin aiemmin laskettu pääkeskuksen 1 vastaava virta.

$$\bar{i}_{s,v2} \approx 45,042 \angle -81,433^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskukselle 2 ekvivalenttimoottorista 2 tulevan oikosulkuvirran virtapiirin kokonaisimpedanssi lasketaan summaamalla ekvivalenttimoottorin 2 ja ekvivalenttijohdon 2 myötäimpedanssit keskenään.

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{E2,kok} &= (331,2194 + j788,6177) \text{ m}\Omega + (66,44 + j2,3) \text{ m}\Omega \\ &\approx (397,66 + j790,92) \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

Jaetaan kokonaisimpedanssi resistanssiin ja reaktanssiin, ja lasketaan niiden avulla sysäyskerroin kaavalla 10.

$$R_{k,E2kok} \approx 397,66 \text{ m}\Omega$$

$$X_{k,E2kok} \approx 790,92 \text{ m}\Omega$$

$$\kappa_{E2} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3 \cdot 397,66 \text{ m}\Omega}{790,92 \text{ m}\Omega}} \approx 1,2368$$

Ekvivalenttimoottorista 2 pääkeskuksen 2 oikosulkuun tuleva sysäys-oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 9.

$$\bar{I}_{s,E2} = 1,2368 \cdot \sqrt{2} \cdot (260,873 \angle -63,308^\circ \text{ A}) \approx 456,31 \angle -63,308^\circ \text{ A}$$

Pääkeskuksen 2 kiskoston sysäys-oikosulkuvirta $I_{s,PK2}$ saadaan summaamalla osavirrat $I_{s,v2}$ ja $I_{s,E2}$ keskenään.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{s,PK2} &= \bar{I}_{s,v2} + \bar{I}_{s,E2} \\ &= (45,042 \angle -81,433^\circ \text{ kA}) + (0,45631 \angle -63,308^\circ \text{ kA}) \\ &\approx 45,475 \angle -81,254^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

8.5.5 Pääkeskuksen 1 pienimmät oikosulkuvirrat

Pienimpiä oikosulkuvirtoja laskettaessa oletetaan, etteivät suuret moottorit ole kytkettynä verkkoon. Oikosulkuvirta koostuu siis ainoastaan syöttävän verkon aiheuttamasta oikosulkuvirrasta.

Syöttöverkosta oikosulkuun tuleva pienin kolmivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan kaavan 3 avulla. Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään c_{\min} -arvoa, joka saadaan taulukosta 3 sekä $Z'_{k,v\min}$ -arvoa. Koska syöttöverkko, muuntaja 1 ja syöttöjohto 1 ovat oikosulkuvirtapiirissä sarjas-

sa, voidaan niiden myötäimpedanssit summata yhteen. Huomioidaan mahdollinen vikaimpedanssi kertomalla oikosulkuvirta vikaimpedanssikertoimella c_{vi} , joka on pienjänniteverkossa 0,6. Saatu oikosulkuvirta on pääkeskuksen 1 kiskoston pienin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Koska pienintä kolmivaiheista oikosulkuvirtaa laskettaessa huomioidaan vikaimpedanssikerroin, tulee se automaattisesti huomioitua myös pienintä kaksi- ja yksivaiheista oikosulkuvirtaa laskettaessa.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3,PK1min} &= \frac{c_{min} U_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}'_{k,vmin} + \bar{Z}_{k,mk} + \bar{Z}_{sj1})} \cdot c_{vi} \\ &= \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,6}{\sqrt{3} \cdot [(0,1899 + j1,8991) \text{ m}\Omega + (1,44 + j9,4914) \text{ m}\Omega + (0,1265 + j0,205) \text{ m}\Omega]} \\ &\approx (1681,0 - j11098) \text{ A} \approx 11,224 \angle -81,387^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

Pääkeskuksen 1 pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan pienimmän kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla kaavalla 7.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k2,PK1min} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (1681,0 - j11098) \text{ A} \\ &\approx (1455,8 - j9610,9) \text{ A} \approx 9,7206 \angle -81,387^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

Pääkeskuksen 1 pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 8. Käytetään Z_0/Z_1 -suhteena muuntajan nolla- ja vastaimpedanssien suhdetta.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k1,PK1min} &= \frac{3}{2 + \frac{(1,8 + j8,3) \text{ m}\Omega}{(1,44 + j9,4914) \text{ m}\Omega}} \cdot (1681,0 - j11098) \text{ A} \\ &\approx (1971,6 - j11510) \text{ A} \approx 11,678 \angle -80,280^\circ \text{ kA}\end{aligned}$$

Pääkeskuksen 1 pienin oikosulkuvirta saadaan siis kaksivaiheisessa oikosulussa.

8.5.6 Pääkeskuksen 2 pienimmät oikosulkuvirrat

Koska pienimpiä oikosulkuvirtoja laskettaessa huomioidaan ainoastaan syöttöverkosta oikosulkuun tuleva oikosulkuvirta ja pääkeskusten 1 ja 2 syötöt ovat identtiset, on pääkeskusten 1 ja 2 kiskostojen pienimmät oikosulkuvirrat yhtä suuria.

$$\bar{I}_{k3,PK1min} \approx 11,224 \angle -81,387^\circ \text{ kA}$$

$$\bar{I}_{k2,PK1min} \approx 9,7206 \angle -81,387^\circ \text{ kA}$$

$$\bar{I}_{k1,PK1min} \approx 11,678 \angle -80,280^\circ \text{ kA}$$

Pääkeskuksen 2 pienin oikosulkuvirta saadaan siis kaksivaiheisessa oikosulussa.

8.6 Jännitteenalenemat pääkeskusten kiskostoissa

8.6.1 Pääkeskuksen 1 jännitteenalenema

Jännitteenalenemalaskuissa käytetään aiemmin laskettuja maksimikuormitusvirtoja $I_{PK1,max}$ ja $I_{PK2,max}$. Muuntajassa 1 ja syöttöjohdossa 1 syntyvä jännitteenalenema lasketaan kaavalla 29. Resistanssina käytetään muuntajan 1 oikosulkuresistanssin ja syöttöjohdon 1 resistanssin (+70 °C) summaa ja reaktanssina muuntajan 1 oikosulkureaktanssin ja syöttöjohdon 1 reaktanssin summaa. Tehokerroin ja vaihekulma saadaan taulukosta 10 ja syöttöjohdon ominaisresistanssi ja -reaktanssi taulukosta 11.

$$\begin{aligned} U_{h,PK1} &= \sqrt{3} \cdot [706,904 \text{ A} \cdot (1,44 \text{ m}\Omega + 30,3 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,005 \text{ km}) \\ &\quad \cdot 0,9954 + 706,904 \text{ A} \\ &\quad \cdot (9,4914 \text{ m}\Omega + 41 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,005 \text{ km}) \cdot \sin 5,489^\circ] \\ &\approx 3,0753 \text{ V} \end{aligned}$$

Muuntajan 1 aiemmin laskettu todellinen yläjännite (syöttöverkon jännite) redusoidaan alajännitepuolen jännitetasoon kaavalla 25.

$$U'_1 = \frac{400 \text{ V}}{20000 \text{ V}} \cdot 20131 \text{ V} = 402,62 \text{ V}$$

Pääkeskuksen 1 todellinen jännite lasketaan kaavalla 28.

$$U_{2,PK1} = 402,62 \text{ V} - 3,0753 \text{ V} \approx 399,54 \text{ V}$$

Koska keskijänniteverkon todellinen jännite on nimellisjännitettä korkeampi, pääkeskuksen 1 jännite on jännitteenalenemasta huolimatta likimain nimellisjännitteensä (400 V) suuruinen. Pääkeskuksen 1 suhteellinen jännitteenalenema lasketaan kaavalla 32.

$$U'_{h,PK1} = \frac{3,0753 \text{ V}}{402,62 \text{ V}} \approx 0,0076383 \approx 0,76 \%$$

Pääkeskuksen 1 suhteellinen jännitteenalenema alittaa siis reilusti ylärajaksi asetetun 2–3 %:n vaatimuksen.

8.6.2 Pääkeskuksen 2 jännitteenalenema

Muuntajassa 2 ja syöttöjohdossa 2 syntyvä jännitteenalenema lasketaan kaavalla 29. Resistanssina käytetään muuntajan 2 oikosulkuresistanssin ja syöttöjohdon 2 resistanssin (+70 °C) summaa ja reaktanssina muuntajan 2 oikosulkureaktanssin ja syöttöjohdon 2 reaktanssin summaa. Tehokerroin ja vaihekulma saadaan taulukosta 10 ja syöttöjohdon ominaisresistanssi ja reaktanssi taulukosta 11.

$$\begin{aligned} U_{h,PK2} &= \sqrt{3} \cdot (451,955 \text{ A} \cdot (1,44 \text{ m}\Omega + 30,3 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,005 \text{ km}) \\ &\quad \cdot 0,9954 + 451,955 \text{ A} \\ &\quad \cdot (9,4914 \text{ m}\Omega + 41 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,005 \text{ km}) \sin 5,489^\circ) \\ &\approx 1,9662 \text{ V} \end{aligned}$$

Pääkeskuksen 2 todellinen jännite lasketaan kaavalla 28 käyttäen aiemmin redusoitua muuntajien todellista yläjännitettä U'_1 .

$$U_{2,PK2} = 402,62 \text{ V} - 1,9662 \text{ V} \approx 400,65 \text{ V}$$

Koska keskijänniteverkon todellinen jännite on nimellisjännitettä korkeampi, pääkeskuksen 2 jännite on jännitteenalenemasta huolimatta likimain nimellisjännitteensä (400 V) suuruinen. Pääkeskuksen 2 suhteellinen jännitteenalenema lasketaan kaavalla 32.

$$U'_{h,PK2} = \frac{1,9662 \text{ V}}{402,62 \text{ V}} \approx 0,0048835 \approx 0,49 \%$$

Pääkeskuksen 2 suhteellinen jännitteenalenema alittaa siis reilusti ylärajaksi asetetun 2–3 %:n vaatimuksen.

8.7 Tehohäviöt

Liitteessä 5 on laskettuna eri ratkaisuvaihtoehtojen syöttöjohtojen aiheuttamat tehohäviöt. Taulukkoon 19 on koottu ratkaisuvaihtoehdon 1 syöttöjohtojen tehohäviöitä ja energiakustannuksia. Sähkön kokonaishintana (energia ja siirto) on käytetty 6,07 snt/kWh (alv 0 %) ja tehoina käytettiin vuoden 2015 näennäistehojen tuntikeskiarvoja. Näistä tehoista laskettiin kunkin tunnin keskimääräinen sähkövirta ja edelleen siirtojohtodossa syntyvä tehohäviö kaavalla 33. Kuormituksen oletettiin jakautuvan jatkuvasti suhteessa 61:39. Energiahäviö on saatu edelleen integroimalla tietokoneohjelmalla tuntikohtaiset tehohäviöt ajan suhteen.

TAULUKKO 19. Ratkaisuvaihtoehdon 1 syöttöjohtojen tuntikohtaisia tehohäviöitä sekä energiahäviöitä ja kustannuksia vuositasona vuoden 2015 sähkönkulutuksella, kun sähkön hinta on 6,07 snt/kWh (alv 0 %)

Suure	Syöttöjohto 1	Syöttöjohto 2	Yhteensä
Keskimääräinen tehohäviö	117 W	48 W	165 W
Suurin tehohäviö	225 W	92 W	317 W
Energiahäviö vuodessa	1028 kWh	420 kWh	1449 kWh
Energiakustannus vuodessa	6,24 €	2,55 €	8,79 €

Kuten taulukosta 19 voidaan havaita, syöttöjohtojen tehohäviön aiheuttamat kustannukset ovat ratkaisuvaihtoehdossa 1 hyvin pienet. Tämä on seurausta syöttöjohtojen lyhyistä pituuksista ja näin ollen pienistä resistansseista.

9 RATKAISUVAIHTOEHTO 2: PUISTOMUUNTAMO

Jotta muuntaja 2 ei jäisi lääketehtaan laajennuksessa laboratoriotilojen keskelle, olisi yksi vaihtoehto sijoittaa uudet muuntajat puistomuuntamoon, tehdasalueelle. Tämä olisi tehtaan paloturvallisuuden kannalta hyvä vaihtoehto, mutta toisaalta tällöin 20 kV:n keskijännite muunnettaisiin 400 V:n pienjännitteeksi kauempana tehtaasta, mikä lisäisi pienjännitekaapeleiden pituutta. Ratkaisun seurauksena syntyvien jännitteenaleneman ja tehohäviön suuruudet herättävät kysymyksiä puistomuuntamon käyttökustannusten ja toiminnan suhteen. Myös sabotoinnin mahdollisuuden riski kasvaisi muuntamon sijaitessa tehdasalueen laidalla.

9.1 Muuntajat

Koska puistomuuntamoratkaisussa muuntajat eivät aiheuta tehtaan paloturvallisuudelle vaaraa, voidaan muuntajiksi valita öljymuuntajat. Valitaan kaksi ABB:n 1000 kVA:n hermeettistä muuntajaa, joiden ominaisuuksia on koottu taulukkoon 20 (29).

TAULUKKO 20. ABB:n 1000 kVA:n hermeettisen muuntajan kilpiarvoja

Nimellisteho, S_n	1000 kVA
Kytkenäryhmä	Dyn11
Ensiöjännite, U_{1N}	20500($\pm 2 \times 2,5\%$) V
Toisiojännite, U_{2N}	400 V
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi, z_k	6 %
Tyhjäkäyntivirta, I_0	0,34 %
Nimelliset kuormitushäviöt, P_{kn}	10500 W
Tyhjäkäyntihäviöt, P_0	770 W
Kokonaispaino	2756 kg
Öljyn paino	541 kg
Jäähdytystapa	ONAN
Käämimateriaali	Alumiini

9.2 Syöttöjohdot

Puistomuuntamosta pääkeskusten syöttöjohdot on tuotava tehtaalle maahan asennettuina. Koska johtovedot ovat pitkät ja muuntajat ovat tehoiltaan melko suuret verrattuna tehtaan normaalikulutukseen, ei niitä kannata mitoittaa kuormitukseltaan 1000 kVA:n muuntajien nimellistehon mukaan. Mitoitetaan sen sijaan johdot liittymän vuoden 2015 tuntikohtaisen huipputehon mukaan. Tämä on tärkeää huomioida syöttöjohtojen ylikuormitussuojausta suunniteltaessa. Koska muuntajat sijaitsevat samassa puistomuuntamossa, on niiden varasyötöt helppo toteuttaa ilman pitkiä johtovetoja pääkeskusten välille.

Kuormitusvirtoina käytetään siis aiemmin laskettuja virtoja $I_{PK1,max}$ ja $I_{PK2,max}$. Todellisuudessa virrat ovat hetkellisesti edellä mainittuja virtoja suurempia, ja todelliset huippuvirrat olisi hyvä tarkistaa mittauksilla. Oletetaan maalajin, johon kaapelit asennetaan, olevan kuivaa soraa, mikä on huomioitava maan lämpöresistiivisyyden korjauskertoimen $C = 0,85$ (20, s. 12). Lasketaan korjauskertoimin huomioitut kuormitusvirrat.

$$I_{B1} = \frac{I_{PK1,max}}{C} = \frac{706,904 \text{ A}}{0,85} \approx 831,652 \text{ A}$$

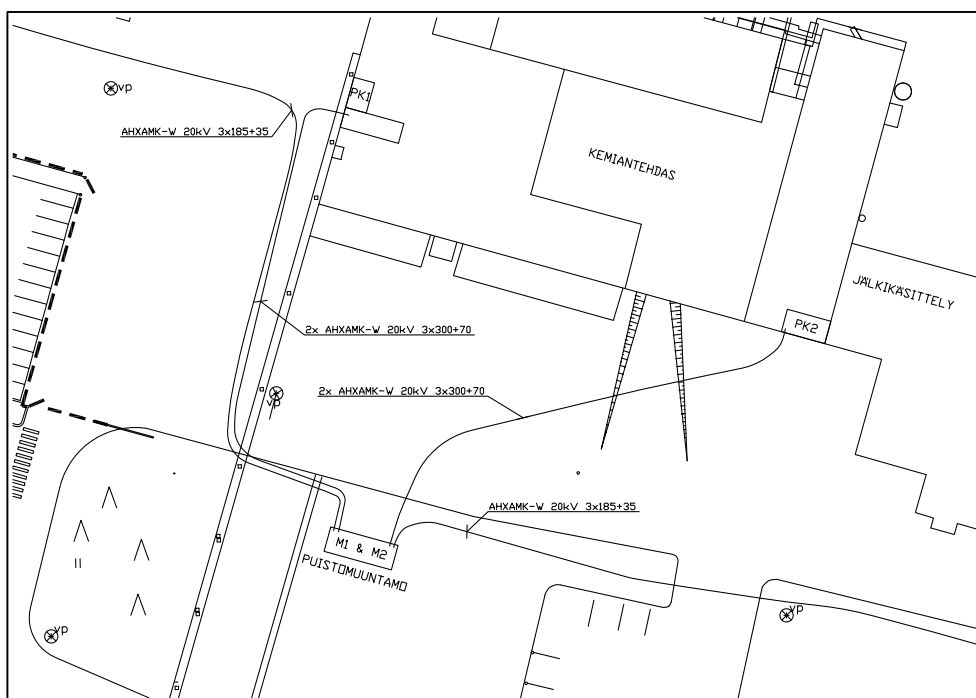
$$I_{B2} = \frac{I_{PK2,max}}{C} = \frac{451,955 \text{ A}}{0,85} \approx 531,712 \text{ A}$$

Syöttöjohtojen kaapelityypiksi valitaan AHXAMK-W 3x300Al+70Cu. Taulukosta 21 voidaan nähdä, ettei yhden kaapelin kuormitettavuus riitä kattamaan kummaltakaan syöttöjohdolta vaadittavaa kuormitusta (31, s. 2).

TAULUKKO 21. Maahan asennetun AHXAMK-W 3x300Al+70Cu -kaapelin ominaisuuksia

AHXAMK-W 3x300Al+70Cu	
Eristyksen materiaali	PEX
Vaipan materiaali	PE
Vaihejohtimen DC-resistanssi (+20 °C)	0,10 Ω/km
Vaihejohtimen AC-resistanssi (+65 °C)	0,12 Ω/km
Vaihejohtimen reaktanssi (50 Hz)	0,11 Ω/km
Kuormitettavuus (+65 °C)	435 A

Vaadittavan kuormitettavuuden kattamiseksi syöttöjohtoina joudutaan käyttämään kahta AHXAMK-W 3x300Al+70Cu -kaapelia rinnankytkettynä. Jotta vältetään kahden lähekkäisen virtapiirin aiheuttama korjauskerroin, on rinnankytketyt kaapelit sijoitettava riittävän etäälle toisistaan. Kahden rinnankytketyn AHXAMK-W 3x300Al+70Cu -kaapelin yhteenlaskettu kuormitettavuus on kaksinkertainen yhden kaapelin kuormitettavuuteen verrattuna, eli 870 A. Tämä riittää kattamaan molempien syöttöjohtojen kuormitettavuuden vaatimukset. Rinnankytkemällä kaksi kaapelia saadaan myös puolitettyä syöttöjohtojen resistanssit ja reaktanssit. Syöttöjohtoon 1 pituudeksi laskettiin 80 metriä ja syöttöjohtoon 2 pituudeksi 75 metriä. Kuvasta 21 voi nähdä puistomuuntamon ja kaapeloinnin sijoittumisen tehdasalueelle.



KUVA 21. Puistomuuntamon ja kaapeloinnin sijoittuminen tehdasalueelle

9.3 Kojeisto

Koska molemmat muuntajat siirrettäisiin puistomuuntamoon, tulisi sinne rakentaa myös uusi keskijännitekojeisto. Tällöin uusittaisiin kaikki keskijännitepuolen kiskot, erottimet ja katkaisijat. Muuntamon 1 viereisen keskijännitetilan sekä muuntamon 2 keskijännitekojeistot tulisi purkaa. Pääkeskusten pienjännitekiskoja ei tarvitsisi uusia, sillä pääkeskuksiin ei tehtäisi suuria muutoksia. Pienjännitepuolen katkaisijoiden kanssa meneteltäisiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1.

9.4 Oikosulkuvirrat 400 V pääkeskusten kiskostoissa

Oikosulkuvirrat ratkaisuvaihtoehdossa 2 laskettiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1. Muuntajien impedanssien laskemista varten käytettiin taulukon 20 muuntajatietoja ja syöttöjohtojen impedanssilaskuissa taulukon 21 kaapelitietoja. Laskennan tuloksina saadut oikosulkuvirrat on koottu taulukkoon 22.

TAULUKKO 22. Oikosulkuvirrat pääkeskusten 1 ja 2 kiskostoissa

Suure	Tunnus	Pääkeskus 1	Pääkeskus 2
Suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta	$I''_{k3,max}$	16,8 kA	14,2 kA
Suurin kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta	$I''_{k2,max}$	14,5 kA	12,3 kA
Suurin yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta	$I''_{k1,max}$	14,2 kA	14,5 kA
Kolmivaiheinen sysäysoikosulkuvirta	i_s	31,2 kA	27,1 kA
Pienin kolmivaiheinen oikosulkuvirta	$I_{k3,min}$	7,9 kA	8,0 kA
Pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta	$I_{k2,min}$	6,8 kA	7,0 kA
Pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta	$I_{k1,min}$	8,2 kA	8,4 kA

Pääkeskuksessa 1 suurin alkuoikosulkuvirta saadaan kolmivaiheisessa oikosulussa, kun taas pääkeskuksessa 2 se saadaan yksivaiheisessa oikosulussa. Pääkeskuksessa 1 kolmivaiheinen sysäysoikosulkuvirta on 31,2 kA ja pääkeskuksessa 2 se on 27,1 kA. Molemmissa pääkeskuksissa pienin oikosulkuvirta saadaan kaksivaiheisessa oikosulussa.

9.5 Jännitteenalenemat pääkeskusten kiskostoissa

Jännitteenalenemat ratkaisuvaihtoehdossa 2 laskettiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1. Syöttöjohtojen resistanssit ja reaktanssit laskettiin taulukon 21 arvojen avulla. Laskennan tuloksina saadut jännitteenalenemat on koottu taulukkoon 23.

TAULUKKO 23. Jännitteenalenemat pääkeskusten 1 ja 2 kiskostoissa

Suure	Tunnus	Pääkeskus 1	Pääkeskus 2
Muuntajan ensiöjännite	U_1	20,1 kV	
Muuntajan ensiöjännite redusoituna toision jännitetasoon	U'_1	402,6 V	
Jännitteenalenema	U_h	9,52 V	5,83 V
Suhteellinen jännitteenalenema	U'_h	2,36 %	1,45 %
Jännite pääkeskuksen kiskostossa	$U_{2,PK}$	393,1 V	396,8 V

Pääkeskuksen 1 suhteellinen jännitteenalenema ei alita ylärajaksi asetettua 2–3 %:n vaatimusta, mutta muuntajan ensiöjännitteen ollessa nimellisjännitettään suurempi pääkeskuksen 1 kiskoston jännite pysyy suhteellisen korkealla. Jännitteenalenemaa olisi edelleen mahdollista kompensoida muuntajan väliottokytkimen asettelulla. Pääkeskuksen 2 suhteellinen jännitteenalenema alittaa 2–3 %:n vaatimuksen.

9.6 Tehohäviöt

Tehohäviöt ratkaisuvaihtoehdossa 2 laskettiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1, ja ne ovat kootusti taulukossa 24.

TAULUKKO 24. Ratkaisuvaihtoehdon 2 syöttöjohtojen tuntikohtaisia tehohäviöitä sekä energiahäviöitä ja -kustannuksia vuositasona vuoden 2015 sähkönkulutuksella, kun sähkön hinta on 6,07 snt/kWh (alv 0 %)

Suure	Syöttöjohto 1	Syöttöjohto 2	Yhteensä
Keskimääräinen tehohäviö	3756 W	1440 W	5196 W
Suurin tehohäviö	7196 W	2758 W	9953 W
Energiahäviö vuodessa	32907 kWh	12610 kWh	45517 kWh
Energiakustannus vuodessa	199,74 €	76,54 €	276,29 €

Kuten taulukosta 24 voidaan havaita, syöttöjohtojen tehohäviön aiheuttamat kustannukset ovat ratkaisuvaihtoehdossa 2 suuremmat kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1. Tämä on seurausta pidempien syöttöjohtojen aiheuttamasta suuremmasta resistanssista.

10 RATKAISUVAIHTOEHTO 3: MUUNTAJAT VIEREKKÄIN

Sisämuuntamo 1, jossa muuntaja 1 sijaitsee, on alun perin suunniteltu laajennettavaksi kahdelle muuntajalle. Muuntamouusinnassa muuntaja 2 voitaisiin siis siirtää muuntamoon 1, jolloin se saataisiin pois laboratoriotilojen välittömästä läheisyydestä. Koska muuntajan 1 syöttöjohto pääkeskukselle 1 pysyisi lyhyenä, myös jännitteenalenema ja tehohäviöt pysyisivät kurissa. Muuntaja 2 olisi nyt kuitenkin kauempana pääkeskuksesta 2, minkä seurauksena syöttöjohdon pituus kasvaisi. Tästä seuraisi suurempi jännitteenalenema ja tehohäviö.

Mikäli muuntajan 2 johdotus sen syöttämälle pääkeskukselle 2 toteutettaisiin tehdasrakennuksen sisäkautta, tulisi kaapeloinnista varsin pitkä. Lisäksi tehtaan nykyiset kaapelihyllyt ovat jo niin täynnä, ettei 400 V:n johdotusta voisi sijoittaa niille, ja tehtaan läpi jouduttaisiin rakentamaan uusi kaapelihylly. Pääkeskuksen 2 syöttöjohdon vieminen tehtaan sisällä voisi aiheuttaa häiriötä vieristen kaapelihyllyjen tiedonsiirtokaapeille ja olla paloturvallisuusriski.

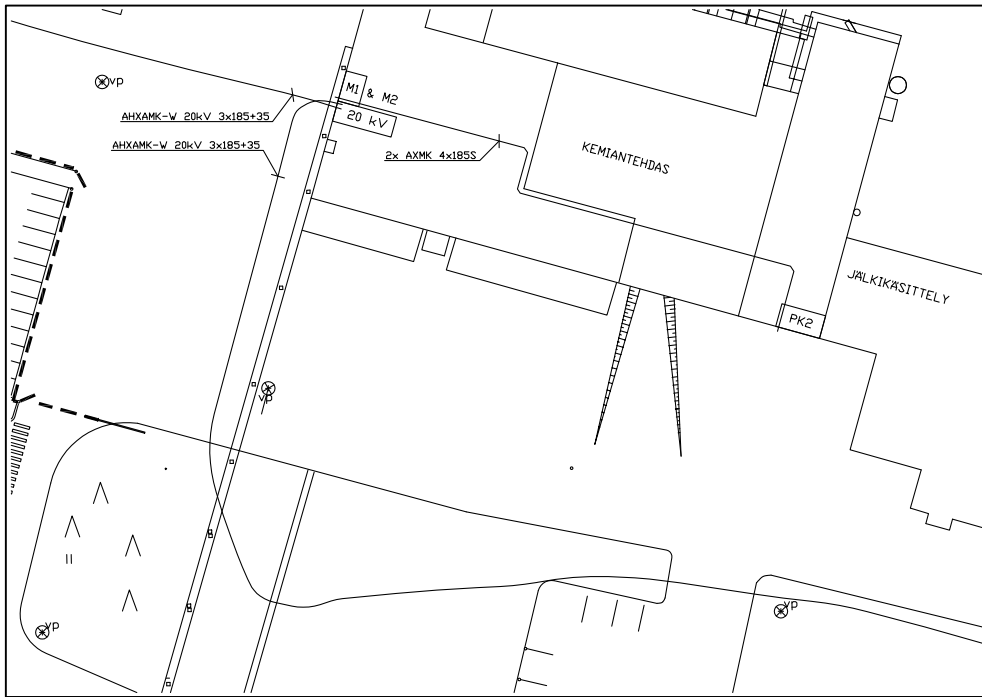
Näistä syistä syöttökaapelin voisi sijoittaa ulos tehtaan katolle. Tällöin kaapeloinnin pituus pysyisi mahdollisimman lyhyenä, eivätkä sen suuret virrat aiheuttaisi häiriötä tehtaan sisäisissä tiedonsiirtokaapeleissa. Ulkokautta kaapeloimalla johtopituudeksi tulisi likimain 100 metriä ja kaapelin referenssiasennustapa olisi katolla E (7, s. 10).

10.1 Muuntajat

Muuntajiksi valitaan kaksi ABB:n 1000 kVA:n hermeettistä muuntajaa, joiden ominaisuuksia on koottu taulukkoon 20.

10.2 Syöttöjohdot

Muuntajan 1 ja pääkeskuksen 1 välisenä syöttöjohtona käytettäisiin nykyistä AMMK 3x4x300+2x300 -kaapelijärjestelmää, jonka kuormitettavuuden riittäminen tarkastettiin ratkaisuvaihtoehdon 1 yhteydessä. Muuntajan 2 ja pääkeskuksen 2 välinen syöttöjohto kulkisi nyt tehtaan katolla tikashyllyllä noin 100 metrin matkan alttiina ulkoilman korkeille lämpötiloille. Kuvasta 22 voi nähdä kaapeloinnin kulkureitit ratkaisuvaihtoehdossa.



KUVA 22. Syöttöjohdon 2 reitti muuntamosta pääkeskukselle 2

Jotta syöttöjohto saataisiin vietyä muuntamosta katolle ja edelleen pääkeskukseen, olisi sen läpäistävä tehdasrakennuksen ulkoseinä kahteen otteeseen. Käytännössä läpivienti voitaisiin toteuttaa 200 mm paksun palokatkon avulla. Arvioidaan palokatkomassan lämmönjohtavuudeksi $0,232 \text{ W/Km}$ (32, s. 21). Mikäli johdinpoikkipinnaltaan enintään 10 mm^2 johto kulkee lämmönjohtavuudeltaan yli $0,0625 \text{ W/Km}$, 200 mm paksun lämpöeristeen läpi, on asennuksen korjauskerroin $C = 0,68$ (30, s. 228). Koska palokatkomassan lämmönjohtavuus on yli 3,5-kertainen edellä mainitun eristeen lämmönjohtavuuteen verrattuna, palokatkoläpiviennin korjauskertoimen C_1 arvioidaan olevan 0,80.

Katolla sijaitsevan johdon kuormitettavuuden kannalta heikoin tilanne olisi kesähelteellä. Jotta auringonsäteilyn vaikutus saataisiin minimoitua, olisi johdot pyrittävä asentamaan varjoon tai suojaamaan ne muuten suoralta auringon säteilyltä. Kesähelteellä ulkoilman lämpötila voi kohota jopa $+35 \text{ °C}$:seen, jolloin on käytettävä korjauskerrointa 0,98. Huomioidaan kuitenkin auringon säteilyvaikutus ja arvioidaan ympäristön lämpötilan olevan $+50 \text{ °C}$, jolloin korjauskerroin C_2 on 0,79 (30, s. 223). Katolla kulkevan johdon heikoin kuormitettavuus olisi siis heti palokatkon jälkeen katon puolella.

Syöttöjohdon 2 kuormitusvirtana käytetään aiemmin laskettua virtaa $I_{PK2,max}$. Todellisuudessa virta on hetkellisesti edellä mainittua virtaa suurempi, ja todellinen huippuvirta olisi hyvä tarkistaa mitauksilla. Lasketaan korjauskertoimin huomioitu kuormitusvirta.

$$I_{B2} = \frac{I_{PK2,max}}{C_1 \cdot C_2} = \frac{451,955 \text{ A}}{0,80 \cdot 0,79} \approx 715,119 \text{ A}$$

Syöttöjohdon 2 kaapelityypiksi valitaan AXMK-PLUS 4G185AN. Taulukosta 25 voidaan nähdä, ettei yhden kaapelin kuormitettavuus riitä kattamaan syöttöjohdolta vaadittavaa kuormitusta (33, s. 2).

TAULUKKO 25. Ilmaan asennetun AXMK-PLUS 4G185AN -kaapelin ominaisuuksia

AXMK-PLUS 4G185AN	
Eristyksen materiaali	PEX (UV-kestoinen)
Vaipan materiaali	PE
Vaihejohtimen DC-resistanssi (+20 °C)	0,164 Ω/km
Vaihejohtimen AC-resistanssi (+65 °C)	0,20 Ω/km
Vaihejohtimen reaktanssi (50 Hz)	0,082 Ω/km
Kuormitettavuus (+90 °C)	365 A

Vaadittavan kuormitettavuuden kattamiseksi syöttöjohtona joudutaan käyttämään kahta AXMK-PLUS 4G185AN -kaapelia rinnankytkettynä. Kaapeleiden asennustapa katolla tikashyllyssä on E. Kun kaapelit asennetaan tikashyllylle niin, että niiden väliin jää kaapelin halkaisijan vahvuinen ilmaväli, vältetään kuormitusta rajoittavalta korjauskertoimelta (20, s. 14). Kahden rinnankytketyn AXMK-PLUS 4G185AN -kaapelin yhteenlaskettu kuormitettavuus on kaksinkertainen yhden kaapelin kuormitettavuuteen verrattuna eli 730 A. Tämä riittää kattamaan syöttöjohdon 2 kuormitettavuuden vaatimuksen. Rinnankytkemällä kaksi kaapelia saadaan puolitettyä syöttöjohtojen resistanssit ja reaktanssit.

10.3 Kojeisto

Koska muuntaja 1 uusittaisiin sen nykyiselle paikalle ja muuntaja 2 sen viereen, jäisi muuntamossa 2 sijaitseva keskijännitekojeisto käyttämättömäksi. Tämän seurauksena muuntamon 1 viereisessä tilassa sijaitsevia keskijännitekiskostoja ei tarvitsisi uusia, kun taas muuntamon 2 keskijännitekiskosto kojeineen jouduttaisiin purkamaan. Pääkeskusten pienjännitekiskoja ei tarvitsisi uusia, sillä pääkeskuksiin ei tehtäisi suuria muutoksia. Keski- ja pienjännitepuolen erottimien ja katkaisijoiden kanssa meneteltäisiin samalla tavalla, kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1. Molempien muuntajien sijaitessa muuntamossa 1 varasyöttö voitaisiin toteuttaa esimerkiksi käyttämällä myös pääkeskuksen 2 syöttöjohto pääkeskuksessa 1, jonne varasyöttöyhteys voitaisiin luoda.

10.4 Oikosulkuvirrat 400 V pääkeskusten kiskostoissa

Oikosulkuvirrat ratkaisuvaihtoehdossa 3 laskettiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdoissa 1 ja 2. Syöttöjohdon 2 impedanssilaskuissa käytettiin taulukon 25 kaapelitietoja. Laskennan tuloksina saadut oikosulkuvirrat on koottu taulukkoon 26.

TAULUKKO 26. Oikosulkuvirrat pääkeskusten 1 ja 2 kiskostoissa

Suure	Tunnus	Pääkeskus 1	Pääkeskus 2
Suurin kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta	$I''_{k3,max}$	22,3 kA	12,7 kA
Suurin kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta	$I''_{k2,max}$	19,3 kA	11,0 kA
Suurin yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta	$I''_{k1,max}$	20,2 kA	12,9 kA
Kolmivaiheinen sysäysoikosulkuvirta	i_s	49,1 kA	20,8 kA
Pienin kolmivaiheinen oikosulkuvirta	$I_{k3,min}$	11,2 kA	7,1 kA
Pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta	$I_{k2,min}$	9,7 kA	6,2 kA
Pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta	$I_{k1,min}$	11,7 kA	7,4 kA

Pääkeskuksessa 1 suurin alkuoikosulkuvirta saadaan kolmivaiheisessa oikosulussa, kun taas pääkeskuksessa 2 se saadaan yksivaiheisessa oikosulussa. Pääkeskuksen 1 kolmivaiheinen sysäysoikosulkuvirta on 49,1 kA ja pääkeskuksen 2 vain 20,8 kA. Molemmissa pääkeskuksissa pienin oikosulkuvirta saadaan kaksivaiheisessa oikosulussa. Pääkeskuksen 2 oikosulkuvirrat ovat pääkeskuksen 1 oikosulkuvirtoja pienempiä syöttöjohdon 2 syöttöjohtoon 1 verrattuna moninker-
taisen pituuden sekä suuremman impedanssin omaavan kaapelityypin vuoksi.

10.5 Jännitteenalenemat pääkeskusten kiskostoissa

Jännitteenalenemat ratkaisuvaihtoehdossa 3 laskettiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdoissa 1 ja 2. Syöttöjohdon 2 resistanssi ja reaktanssi laskettiin taulukon 25 arvojen avulla. Laskennan tuloksina saadut jännitteenalenemat on koottu taulukkoon 27.

TAULUKKO 27. Jännitteenalenemat pääkeskusten 1 ja 2 kiskostoissa

Suure	Tunnus	Pääkeskus 1	Pääkeskus 2
Muuntajan ensiöjännite	U_1	20,1 kV	
Muuntajan ensiöjännite redusoituna toision jännitetasoon	U'_1	402,6 V	
Jännitteenalenema	U_h	3,36 V	10,12 V
Suhteellinen jännitteenalenema	U'_h	0,84 %	2,51 %
Jännite pääkeskuksen kiskostossa	$U_{2,PK}$	399,3 V	392,5 V

Pääkeskuksen 2 suhteellinen jännitteenalenema ei alita ylärajaksi asetettua 2–3 %:n vaatimusta, mutta muuntajan ensiöjännitteen ollessa nimellisjännitettään suurempi pääkeskuksen 2 kiskoston jännite pysyy suhteellisen korkealla. Jännitteenalenemaa olisi edelleen mahdollista kompensoida muuntajan väliottokytkimen asettelulla. Pääkeskuksen 1 suhteellinen jännitteenalenema alittaa 2–3 %:n vaatimuksen.

10.6 Tehohäviöt

Tehohäviöt ratkaisuvaihtoehdossa 3 laskettiin samalla tavalla kuin ratkaisuvaihtoehdoissa 1 ja 2, ja ne ovat kootusti taulukossa 28.

TAULUKKO 28. Ratkaisuvaihtoehdon 3 syöttöjohtojen tuntikohtaisia tehohäviöitä sekä energiahäviöitä ja -kustannuksia vuositasona vuoden 2015 sähkönkulutuksella, kun sähkön hinta on 6,07 snt/kWh (alv 0 %)

Suure	Syöttöjohto 1	Syöttöjohto 2	Yhteensä
Keskimääräinen tehohäviö	117 W	3199 W	3316 W
Suurin tehohäviö	225 W	6128 W	6353 W
Energiahäviö vuodessa	1028 kWh	28022 kWh	29051 kWh
Energiakustannus vuodessa	6,24 €	170,10 €	176,34 €

Kuten taulukosta 28 voidaan havaita, syöttöjohtojen 1 ja 2 tehohäviöt ovat keskenään eri suuruusluokkaa. Tämä johtuu siitä, että syöttöjohdot ovat keskenään eripituiset, minkä vuoksi niiden resistanssit ovat erisuuruisia.

11 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Muuntamouusinnan ratkaisuvaihtoehtojen välillä on useita eroavaisuuksia, ja jokaisessa vaihtoehdossa on hyvät ja huonot puolensa. Koska lääketehtaan sähkönsyötön suunnittelussa on monta eri lähtökohtaa, kuten turvallisuus, toimintavarmuus, kuormitettavuus ja kustannustehokkuus, on lopullisen ratkaisuvaihtoehdon valitseminen pakostakin jonkinasteinen kompromissi.

Turvallisuuskäsitteeseen liittyy esimerkiksi muuntajatyypin ja muuntajan sijainnin valinta. Kuivamuuntaja on lähtökohtaisesti öljymuuntajaa turvallisempi sen pienemmän palokuorman vuoksi. Kuivamuuntaja voitaisiin siis valita tarvittaessa myös ratkaisuvaihtoehtoihin 2 ja 3. Lasketut oikosulkuvirrat, jännitteenalenemat ja tehohäviöt olisivat silti likimain paikkaansa pitäviä, sillä ratkaisuvaihtoehdon 1 kuivamuuntaja on ominaisuuksiltaan varsin yhtenevä ratkaisuvaihtoehtojen 2 ja 3 hermeettisen muuntajan kanssa. Paloturvallisuuteen liittyy myös muuntajan sijainti. Puistomuuntamossa muuntajapalo ei pääsisi leviämään tehtaan muihin osiin samalla tavalla, kuin sisämuuntamossa syttyvä palo. Toisaalta taas puistomuuntamo voi vetää puoleensa vandalismia.

Tarkasteltaessa muuntamoratkaisujen toimintavarmuutta pääkeskusten välinen varasyöttö nousee avaintekijäksi. Muuntajien sijaitessa samassa muuntamossa ratkaisuvaihtoehtoisissa 2 ja 3 varasyötön toteuttaminen olisi huomattavasti helpompaa kuin ratkaisuvaihtoehdossa 1, jossa sekä muuntajat, että pääkeskukset sijaitsevat eri puolilla tehdasrakennusta. Ratkaisuvaihtoehdossa 1 toimivien tapojen toteuttaminen varasyöttö voisi olla hyödyntämällä nykyinen varasyöttöyhteys ja vahvistamalla sitä tarpeen vaatiessa. Muuntajien sijaitseminen samassa muuntamossa on kuitenkin toisaalta myös riski. Mikäli yhteinen muuntamo tuhoutuisi tulipalossa, sähköjakeluun muodostuisi katkos.

Kun tarkastellaan muuntajien ja sähkönsyötön toimintavarmuutta, on pyrittävä hahmottamaan myös tehtaan muun tekniikan toimintavarmuus. Muuntajat eivät saa häiritä esimerkiksi laboratorion mittalaitteita tai syöttöjohdot tehtaan heikkovirtakaapeleita. Niinpä ratkaisuvaihtoehdossa 1 on tärkeä suunnitella myös muuntamon rakenteet siten, etteivät magneettikentät ulotu laboratoriotiloihin. Tämä voidaan tehdä paitsi toteuttamalla muuntajan pienjänniteyhdistys koteloituna ja mahdollisimman matalalla myös suunnittelemalla muuntamon rakenteet niin, että ne muodostavat muuntajan ympärille suljetun Faradayn häkin.

Mietittäessä muuntajauusintaa sähköteknisestä näkökulmasta, on otettava huomioon niin syysäysoikosulkuvirrat kuin jännitteenalenemat ja kuormitettavuudetkin. Oikosulkuvirtojen kasvaessa myös virrankestojen ja komponenttien mekaanisen kestävyys on kasvatettava. Kun taas kasvatetaan etäisyyksiä, kasvaa myös jännitteenalenema ja tehohäviö. Toisaalta komponentteja ei kuitenkaan voida ylittää, sillä silloin kasvavat kustannukset.

Sähkölaitteiden lisäksi on investoitava myös muuntamorakennuksiin. Ilman tarkempaakin tarkastelua voidaan todeta puistomuuntamon rakentamisen tulevan kalliimmaksi, kuin nykyisten sisämuuntamotilojen uudistaminen. Toisaalta muuntamouusinnassa on otettava huomioon myös tulevaisuudennäkymät. Muuntajien siirtämisellä ulos tehdasrakennuksesta voidaan säästyä vielä tuntemattomilta ongelmilta, jotka voivat liittyä esimerkiksi kymmenien vuosien päästä tehtäviin ratkaisuihin. Investointikustannusten lisäksi on huomioitava käyttökustannukset. Tehohäviöt aiheuttavat liittymän tehonkulutukseen kasvun, mikä taas näkyy sähkölaskussa. Mitä lähemmäksi muuntajat saadaan sijoitettua pääkeskuksia, sitä lyhyemmän matkaa sähköä joudutaan siirtämään pienjännitteellä, suurilla virroilla. Edelleen mitä lyhyemmän matkaa suuria virtoja siirretään johdoissa, sitä vähemmän muodostuu häviöenergiaa ja kustannuksia.

Taulukossa 29 on koottuna muuntamouusinnan eri ratkaisuvaihtoehtojen oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat. Taulukosta on nähtävissä, että oikosulkuvirrat ovat pienempiä tilanteissa, jossa pääkeskuksen syöttöjohto on pitkä. Näissä samoissa tilanteissa myös jännitteenalenemat kasvavat suurimmiksi. Jännitteenaleneman ollessa yli 2 %, olisi jännitteenalenema hyvä laskea ja tarkistaa myös kauimmaisten kulutuskojeiden päässä.

TAULUKKO 29. Eri ratkaisuvaihtoehtojen oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat

Tunnus	Ratkaisuvaihtoehto 1		Ratkaisuvaihtoehto 2		Ratkaisuvaihtoehto 3	
	PK 1	PK 2	PK 1	PK 2	PK 1	PK 2
$I''_{k3,max}$	22,3 kA	19,6 kA	16,8 kA	14,2 kA	22,3 kA	12,7 kA
$I''_{k2,max}$	19,3 kA	17,0 kA	14,5 kA	12,3 kA	19,3 kA	11,0 kA
$I''_{k1,max}$	20,2 kA	20,2 kA	14,2 kA	14,5 kA	20,2 kA	12,9 kA
i_s	50,1 kA	45,5 kA	31,2 kA	27,1 kA	49,1 kA	20,8 kA
$I_{k3,min}$	11,2 kA	11,2 kA	7,9 kA	8,0 kA	11,2 kA	7,1 kA
$I_{k2,min}$	9,7 kA	9,7 kA	6,8 kA	7,0 kA	9,7 kA	6,2 kA
$I_{k1,min}$	11,7 kA	11,7 kA	8,2 kA	8,4 kA	11,7 kA	7,4 kA
U_h	3,08 V	1,97 V	9,52 V	5,83 V	3,36 V	10,12 V
U'_h	0,76 %	0,49 %	2,36 %	1,45 %	0,84 %	2,51 %
$U_{2,PK}$	399,5 V	400,7 V	393,1 V	396,8 V	399,3 V	392,5 V

Taulukkoon 30 on koottu eri ratkaisuvaihtoehtojen syöttöjohtojen teho- ja energiahäviöt sekä energiakustannukset. Ratkaisuvaihtoehdossa 2 tehohäviö on suurin, sillä siinä molemmat muuntajat sijaitsisivat kaukana pääkeskuksistaan. Pienin tehohäviö sen sijaan saavutetaan ratkaisuvaihtoehdolla 1, jossa on hyvin pieni-impedanssiset ja lyhyet syöttöjohdot. Vuosittaisten energiakustannusten avulla on myös mahdollista arvioida, olisiko pitkällä aikavälillä kannattavaa suurentaa syöttöjohtojen johdinpoikkipintoja, jotta saavutettaisiin pienempi tehohäviö ja näin ollen pienemmät energiakustannukset.

TAULUKKO 30. Eri ratkaisuvaihtoehtojen syöttöjohtojen tuntikohtaisia tehohäviöitä sekä energiahäviöitä ja -kustannuksia vuositasona vuoden 2015 sähkönkulutuksella, kun sähkön hinta on 6,07 snt/kWh (alv 0 %)

Suure	Ratkaisuvaihtoehto 1			Ratkaisuvaihtoehto 2			Ratkaisuvaihtoehto 3		
	SJ 1	SJ 2	Yht.	SJ 1	SJ 2	Yht.	SJ 1	SJ 2	Yht.
Keskimääräinen tehohäviö W	117	48	165	3756	1440	5196	117	3199	3316
Suurin tehohäviö W	225	92	317	7196	2758	9953	225	6128	6353
Energiahäviö vuodessa kWh	1028	420	1449	32907	12610	45517	1028	28023	29051
Energiakustannus vuodessa €	6,24	2,55	8,79	199,74	76,54	276,29	6,24	170,10	176,34

12 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli vertailla Fermion Oy:n Oulun lääketehaan muuntajien uusinnan ja uudelleensijoittamisen eri ratkaisuvaihtoehtoja sekä niiden hyötyjä ja haittoja. Vertailuun valittiin kolme mielestäni parasta ja toteuttamiskelpoisinta ratkaisuvaihtoehtoa, mutta toki mahdollisia toteutustapoja on vielä näiden vaihtoehtojen ulkopuolellakin. Tarkastelluista vaihtoehdoista kaikki olisivat toteuttamiskelpoisia opinnäytetyössä huomioitujen näkökohtien perusteella, joskin niiden hyödyissä ja haitoissa on eroja. Lopullista ratkaisua tehtäessä onkin määriteltävä, mitä ominaisuuksia muuntamoilta ja sähkönsyötöltä arvostetaan eniten.

Ennen ratkaisuvaihtoehdon valintaa tulisi laskennan pohjana käytetyt oletukset, kuten liittymän huipputeho ja kuormituksen jakautuminen pääkeskusten välillä, tarkistaa. Mikäli esimerkiksi liittymän huipputeho olisi reilusti suurempi, täytyisi ratkaisuvaihtoehdon 2 molempien syöttöjohtojen ja ratkaisuvaihtoehdon 3 syöttöjohdon 2 johdinpoikkipintaa kasvattaa. Mikäli taas kuormituksen jakautuminen pääkeskusten välillä olisi oletetusta 61:39-suhteesta reilusti poikkeava, voisi sekin johtaa johdinpoikkipintojen kasvattamiseen. Myös oikosulkuvirtojen tarkempi laskeminen tehtaan eri osissa olisi suotavaa etenkin, jos johdinpoikkipintoja tullaan vielä muuttamaan. Jännitteenalenemalaskuissa laskin jännitteenalenemat pääkeskuksissa. Todellisuudessa suurin jännitteenalenema esiintyy usein kauimmaisen kulutuskojeen syöttöjohdon päässä. Mikäli siis pääkeskuksessa jännitteenalenema on noin 3 %:n luokkaa, voi se kulutuskojeella olla vielä runsaasti enemmän. Suuri jännitteenalenema on kuitenkin yleensä kompensoitavissa muuntajan käämi- tai väliottokytkimillä.

Työ sujui osaltani suhteellisen vaivattomasti. Sain hyvin tukea ohjaavalta opettajaltani sekä työtäni valvoneelta lääketehaan sähkötöiden johtajalta, mikä helpotti omaa työtäni. Kuten opinnäytetyön sivumäärästä saattaa havaita, työ pyrki laajentumaan opinnäytetyön puitteiden yli. Tämä kertonee osaltaan siitä, että muuntamouusinnassa huomioon otettavia seikkoja on runsaasti. Näistä seikoista selvitin vain osan; esimerkiksi investointi- ja käyttökustannuksia en työssäni käsitellyt. Ratkaisujen kustannustehokkuudet ja takaisinmaksuajat ovat varmasti tärkeitä yrityksen lopullisessa ratkaisussa.

Opin opinnäytetyötä tehdessäni paljon etenkin oikosulkuvirtojen luonteesta ja laskennasta. Opinnäytetyön työläin osa ei ollut varsinaisesti laskenta, vaan lääketehaan nykyisen tilan kartoittami-

nen ja teorian tiedon kerääminen sekä teorian yhdistäminen käytännön laitteisiin ja komponentteihin. Yhtä kaikki, opinnäytetyön tekeminen oli opettavainen ja miellyttävä kokemus, ja sen työmäärä oli sopiva.

LÄHTEET

1. Aura, Lauri – Tonteri, Antti J. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2. uudistettu painos. Porvoo: WSOY.
2. Korpinen, Leena 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. 9 Muuntajat ja sähkölaitteet. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf. Hakupäivä 18.1.2016.
3. Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
4. ABB. 2000. TTT-käsikirja 2000-07. Luku 11: Tehomuuntajat. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/11_Tehomuuntajat.pdf. Hakupäivä 18.1.2016.
5. Monni, Markku 2005. Sähköverkkoasennukset, 6. kokonaan uusittu painos. Helsinki: Adato Energia Oy.
6. Mäkinen, Markku J.J. – Kallio, Raimo 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Keuruu: Otava
7. Anjala, Risto 2008. SA 2:08, Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Adato Energia Oy.
8. ABB. 2000. TTT-käsikirja 2000-07. Luku 13: Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/13_S%84hk%94asemat-kojaistot-muuntamot.pdf. Hakupäivä 18.1.2016.
9. Monni, Markku 2003. Sähkölaitosasentajan ammattioppi 3. Jakelumuuntamotyöt Sähköasematyöt, 4. uudistettu painos. Helsinki: Adato Energia Oy.
10. E1 2011. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011. E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37126-E1_2011-fi.pdf. Hakupäivä 19.1.2016.

11. Korpinen, Leena 2003. Yleisön altistuminen pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille Suomessa. 6. Rakennusten sähkö- ja magneettikentät. Saatavissa:
http://www.leenakorpinen.fi/archive/stm_opus/6rakennustensahkojamagneettikentat.pdf.
Hakupäivä 19.1.2016.
12. Saari, Pekka – Keikko, Tommi – Korpinen, Leena 1999. Sähkön tuotanto ja kulutus. Opetusmoniste. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa:
http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/sahkon_tuotanto_ja_kulutus.pdf. Hakupäivä 22.2.2016.
13. Hietalahti, Lauri 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka.
14. Huotari, Kari – Partanen, Jarmo 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
15. ABB. 2000. TTT-käsikirja 2000-07. Luku 8: Maasulkusuojaus. Saatavissa:
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf. Hakupäivä 18.1.2016.
16. Welling, Juho 2010. Elintarviketehtaan sähköverkon selvitys ja kehittämissuunnitelma. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta.
17. Aura, Lauri – Tonteri, Antti J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY.
18. ABB. 2000. TTT-käsikirja 2000-07. Luku 18: Sähkömoottorikäytöt. Saatavissa:
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/18_S%84hk%94moottorik%84yt%94t.pdf.
Hakupäivä 18.1.2016.
19. Korpinen, Leena 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. 4 Sähköverkkojen laskentaa. Saatavissa:
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/4sahkoverkkojen_laskenta.pdf. Hakupäivä 7.3.2016.

20. ABB. 2000. TTT-käsikirja 2000-07. Luku 19: Sähköjohtojen mitoittaminen. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/19_1_S%84hk%94johtojen%20mitoitminen.pdf. Hakupäivä 18.1.2016.
21. Lakervi, Erkki – Partanen, Jarmo 2008. Sähkönjakelutekniikka, 3. painos. Helsinki: Otatieto.
22. Jakeluverkkojen tekninen laskenta. 2010. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
23. Iivonen, Esko 2007. Tuotantolaitoksen pääsähköjärjestelmän dokumentointi ja riskianalyysi. Tutkintotyö. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.
24. 1 kV kaapelijärjestelmät. 1992. Tekninen opas. Nokia kaapeli Oy.
25. AMCMK. 2013. Tekninen opas. Prysmian Group. Saatavissa: http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/download/datasheets/AMCMK.pdf. Hakupäivä 28.4.2016.
26. Kiinteistömuuntamoiden aiheuttamat magneettikentät. 2007. TransCat-projekti 1.12.2005-1.2.2007, loppuraportti. Helsinki: Energiatieteellisyys.
27. SACE Novomax. 2016. ABB. Saatavissa: <http://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers/legacy-products/novomax>. Hakupäivä 28.4.2016.
28. Open Up to the Great Little Air Circuit-breaker. 2006. Esite. ABB. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/d9c98de7dea0f786c1257142002b46a1/1SDC200009B0201.pdf>. Hakupäivä 28.4.2016.
29. Fant, Kristoffer 2016. Re: Muuntajatietoja opinnäytetyötä varten. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Janne Keränen. 21.4.2016.
30. Tiainen, Esa 2012. D1-2012. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Espoo: Sähköinfo Oy.

31. AHXAMK-W 10 kV 3-johtiminen. 2013. Tekninen opas. Prysmian Group. Saatavissa:
http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/download/datasheets/AHXAMK-W_10kv.pdf. Hakupäivä 28.4.2016.
32. Hilti palokatkomassa CFS-M RG. 2012. Tekninen opas. Hilti. Saatavissa:
https://www.hilti.fi/medias/sys_master/documents/h91/9107692617758/Tekninen_ohje_CFS-M_RG_sementtipohjainen_palokatkomassa_Tekninen_dokumentti_ASSET_DOC_LOC_2441105.pdf. Hakupäivä 28.4.2016.
33. AXMK-PLUS 4-johtiminen. 2013. Tekninen opas. Prysmian Group. Saatavissa:
http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/download/datasheets/AXMK-PLUS_4joht.pdf. Hakupäivä 28.4.2016.

LIITTEET

Liite 1 Fermion Oy:n Oulun lääketehaan sähkönkulutuksen vuosiraportti 2015

Liite 2 (vain toimeksiantajan käyttöön) Fermion Oy:n Oulun lääketehaan sähkönkulutuksen jakauma

Liite 3 (vain toimeksiantajan käyttöön) Fermion Oy:n Oulun lääketehaan sähkönkulutuksen tunti-sarjat

Liite 4 SA 2:08, liite 3 (7, s. 38–39)

Liite 5 (vain toimeksiantajan käyttöön) Eri ratkaisuvaihtoehtojen syöttöjohtojen tehohäviöt

FERMION OY:N OULUN LÄÄKETEHTAAN SÄHKÖNKULUTUKSEN VUOSIRAPORTTI 2015

LIITE 1

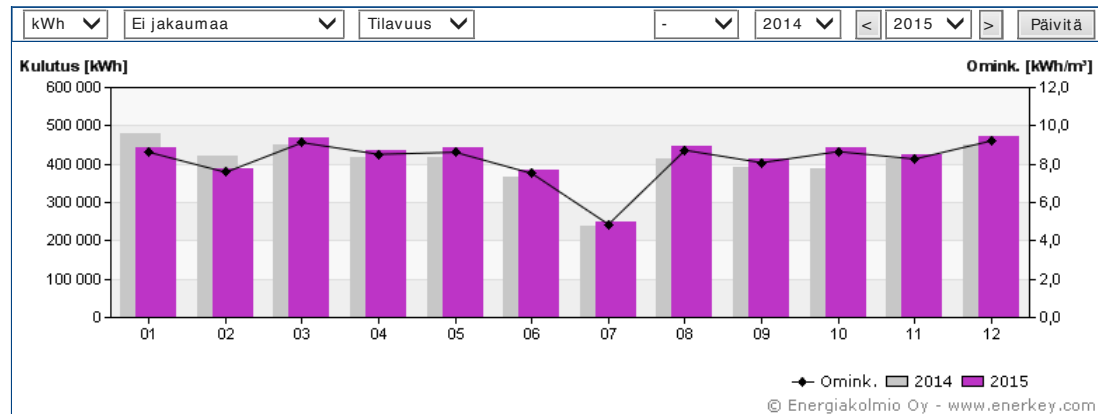
Vuosiraportti, Sähkö (2015)



60890

8.2.2016

Kohde Fermion Oy, Oulu		Katuosoite Lääketehtäantie 2, 90650 OULU	
Yritys ORION OYJ		Omistaja -	
Lämmitysmuoto -	Kiinteistötyyppi 69 Teollisuuden tuotantorakennukset	Valmistumisvuosi -	Tilavuus 51 270 m ³



Yhteensä [kWh]					
Kuukausi	2014	2015	Muutos	Maksimi [kW]	Loishuippu [kVar]
Tammikuu	480 646	442 044	-8,0 %	749	-
Helmikuu	421 814	388 596	-7,9 %	682	-
Maaliskuu	450 360	467 861	3,9 %	770	-
Huhtikuu	416 431	436 579	4,8 %	744	-
Toukokuu	418 706	442 054	5,6 %	799	-
Kesäkuu	367 666	385 330	4,8 %	744	-
Heinäkuu	237 302	249 254	5,0 %	598	-
Elokuu	413 902	447 502	8,1 %	751	-
Syyskuu	392 014	414 190	5,7 %	698	-
Lokakuu	386 215	443 856	14,9 %	797	-
Marraskuu	412 978	423 979	2,7 %	708	-
Joulukuu	450 036	472 596	5,0 %	794	-
Yhteensä	4 848 070	5 013 840	3,4 %	799	-
Ominaiskulutus [kWh/m ³]	94,6	97,8			

Jakauma		Kulutus	
Päivä (07-22)	3 162 336 kWh	Maksimi	799 kW
Yö (22-07)	1 851 504 kWh	Kulutuksen keskiarvo	572 kW
Arkipäivä	2 649 703 kWh	Minimi	108 kW
Yö/pyhä	2 364 137 kWh		



Energiateollisuus

Verkostosuositus SA2:08

Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan
SÄHKÖINEN MITOITTAMINENSA 2:08, LIITE 3
1(2)JOHTOJEN RESISTANSSIT JA REAKTANSSIT SEKÄ AMKA 3x35+50,
AMKA 3x70+95 JA AXMK 4x185 S VASTAAVAT PITUUSKERTOIMET

JOHTO	R _v (+40 °C) Ω/km	R ₀ (+ 40 °C) Ω/km	X _v Ω/km	X ₀ Ω/km	X ₀ Ω/km	PITUUSKERROIN		
						Perusjohto AMKA 3x35+50	Perusjohto AMKA 3x70+95	Perusjohto AXMK 4x185 S
Avojohto								
2x21/4 Al/Fe	1,470	1,470	0,400	0,000	0,400	1,782	3,411	7,551
4x21/4 Al/Fe	1,470	1,470	0,378	0,567	0,396	1,808	3,460	7,657
4x34/6 Al/Fe	0,917	0,917	0,359	0,551	0,377	1,183	2,264	5,012
4x54/9 Al/Fe	0,580	0,580	0,340	0,525	0,358	0,820	1,569	3,473
4x85/14 Al/Fe	0,365	0,365	0,321	0,503	0,337	0,606	1,160	2,566
AMKA								
1x16+25	2,064	1,491	0,090	0,000	0,074	2,101	4,025	8,898
1x25+35	1,297	1,065	0,090	0,000	0,074	1,399	2,677	5,946
3x16+25	2,064	1,491	0,108	0,055	0,074	2,101	4,021	8,902
3x25+35	1,297	1,065	0,106	0,045	0,073	1,404	2,679	5,950
3x35+50	0,938	0,778	0,104	0,045	0,073	1,000	1,914	4,237
3x35+70	0,938	0,533	0,103	0,045	0,072	0,875	1,674	3,706
3x50+70	0,693	0,533	0,101	0,045	0,071	0,730	1,397	3,095
3x70+95	0,479	0,392	0,097	0,045	0,070	0,523	1,000	2,214
3x120+95	0,273	0,392	0,092	0,030	0,078	0,404	0,772	1,707
AMCMK								
3x16+10 Cu	2,064	2,060	0,082	0,082	-	2,436	4,663	10,32
3x25+10 Cu	1,298	2,060	0,082	0,082	-	1,999	3,803	8,419
3x25+16 Cu	1,298	1,240	0,082	0,082	-	1,503	2,875	6,365
3x35+10 Cu	0,939	2,060	0,082	0,082	-	1,774	3,395	7,514
3x35+16 Cu	0,939	1,240	0,082	0,082	-	1,459	2,455	5,400
3x50+16 Cu	0,694	1,240	0,078	0,078	-	1,144	2,189	4,846
3x70+21 Cu	0,480	0,936	0,075	0,075	-	0,839	1,605	3,551
3x95+29 Cu	0,348	0,691	0,075	0,075	-	0,616	1,179	2,605
3x120+41 Cu	0,276	0,478	0,072	0,072	-	0,449	0,859	1,897
3x150+41 Cu	0,226	0,478	0,072	0,072	-	0,418	0,801	1,767
3x185+57 Cu	0,181	0,345	0,072	0,072	-	0,315	0,603	1,330
3x240+72 Cu	0,140	0,275	0,072	0,072	-	0,248	0,474	1,050
3x300+88 Cu	0,114	0,225	0,069	0,069	-	0,204	0,390	0,864
AURA								
3x50+29 Cu	0,694	0,691	0,078	0,078	-	0,820	1,568	3,472
3x95+57 Cu	0,348	0,345	0,075	0,075	-	0,414	0,795	1,750
3x150+88 Cu	0,226	0,225	0,072	0,072	-	0,268	0,513	1,137
APAKM								
3x35+35	0,941	0,941	0,072	0,072	-	1,114	2,131	4,717
3x70+70	0,479	0,479	0,066	0,066	-	0,568	1,086	2,405
3x120+120	0,278	0,278	0,062	0,062	-	0,331	0,633	1,401
3x185+185	0,183	0,183	0,060	0,060	-	0,214	0,420	0,929
AXCMK								
3x16+10	2,064	2,060	0,078	0,078	-	2,436	4,663	10,32
3x25+10	1,298	2,060	0,076	0,076	-	1,999	3,803	8,419
3x35+10	0,939	2,060	0,075	0,075	-	1,774	3,394	7,514
3x70+21	0,480	0,936	0,072	0,072	-	0,838	1,694	3,551



Energiateollisuus

Verkostosuositus SA2:08

Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan
SÄHKÖINEN MITOITTAMINENSA 2:08, LIITE 3
2(2)JOHTOJEN RESISTANSSIT JA REAKTANSSIT SEKÄ AMKA 3x35+50,
AMKA 3x70+95 JA AXMK 4x185 S VASTAAVAT PITUUSKERTOIMET, jatkoa

JOHTO	R _v (+40 °C) Ω/km	R ₀ (+ 40 °C) Ω/km	X _v Ω/km	X ₀ Ω/km	X ₀ Ω/km	PITUUSKERROIN		
						Perusjohto AMKA 3x35+50	Perusjohto AMKA 3x70+95	Perusjohto AXMK 4x185 S
3x120+41	0,276	0,478	0,069	0,069	0,001	0,448	0,858	1,899
3x185+57	0,181	0,345	0,069	0,069	0,001	0,314	0,602	1,332
3x300+88	0,114	0,225	0,069	0,069	0,001	0,204	0,390	0,864
AXMK								
4x16 S	2,064	2,064	0,091	0,091	0,091	2,970	4,675	10,35
4x25 S	1,298	1,298	0,088	0,088	0,088	1,537	2,942	6,514
4x35 S	0,939	0,939	0,088	0,088	0,088	1,115	2,134	4,725
4x50 S	0,694	0,694	0,087	0,087	0,087	0,826	1,581	3,499
4x70 S	0,480	0,480	0,085	0,085	0,085	0,576	1,103	2,442
4x95 S	0,348	0,348	0,084	0,084	0,084	0,428	0,819	1,813
4x120 S	0,276	0,276	0,082	0,082	0,082	0,342	0,654	1,447
4x150 S	0,226	0,226	0,082	0,082	0,082	0,278	0,533	1,181
4x185 S	0,181	0,181	0,082	0,082	0,082	0,236	0,452	1,000
4x240 S	0,140	0,140	0,079	0,079	0,079	0,191	0,366	0,810
4x300 S	0,114	0,114	0,079	0,079	0,079	0,166	0,318	0,703
MCMK								
3x2,5+2,5	7,992	7,992	0,115	0,115	-	8,999	17,221	-
3x6+6	3,322	3,322	0,115	0,115	-	3,867	7,401	16,381
3x10+10	1,974	1,974	0,110	0,110	-	2,307	4,415	9,774
3x16+16	1,240	1,240	0,088	0,088	-	1,467	2,808	6,216
3x25+16	0,786	1,240	0,082	0,082	-	1,198	2,293	5,077
3x35+16	0,566	1,240	0,077	0,077	-	1,069	2,046	4,531
3x50+25	0,419	0,786	0,076	0,076	-	0,719	1,375	3,045
3x70+35	0,291	0,566	0,075	0,075	-	0,509	0,975	2,158
3x95+50	0,211	0,419	0,074	0,074	-	0,397	0,759	1,681
3x120+70	0,168	0,291	0,074	0,074	-	0,275	0,527	1,167
3x150+70	0,138	0,291	0,073	0,073	-	0,255	0,488	1,080
3x185+95	0,112	0,211	0,072	0,072	-	0,195	0,373	0,827
3x240+120	0,087	0,168	0,072	0,072	-	0,157	0,301	0,666
MMJ								
2x6	3,322	3,322	-	-	-	3,867	7,415	16,381
2x10	1,974	1,974	-	-	-	2,307	4,415	9,774
4x6	3,322	3,322	0,115	0,115	0,115	3,867	7,401	16,381
4x10	1,974	1,974	0,110	0,110	0,110	2,307	4,415	9,774
4x16	1,240	1,240	0,088	0,088	0,088	1,467	2,808	6,216
PLKVJ								
3x10+10	1,950	1,950	0,110	0,110	0,110	2,213	4,424	9,784
3x16+16	1,230	1,230	0,105	0,105	0,105	1,464	2,803	6,184
3x25+16	0,787	1,230	0,094	0,094	0,094	1,200	2,297	5,074
3x35+16	0,568	1,230	0,094	0,094	0,094	1,071	2,050	4,528
3x50+25	0,420	0,787	0,088	0,088	0,088	0,721	1,380	3,055
3x70+35	0,292	0,568	0,088	0,088	0,088	0,519	0,993	2,199
3x95+50	0,212	0,420	0,085	0,085	0,085	0,387	0,741	1,639
3x120+70	0,169	0,292	0,085	0,085	0,085	0,291	0,556	1,231